



This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

- + *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.
- + *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.
- + *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.
- + *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at <http://books.google.com/>

5B 24 115

QC

721

G 8. "



Die radioaktiven Substanzen

und

Die Theorie des Atomzerfalles

von

Dr. Paul Gruner

Prof. tit. der Physik an der Universität Bern.



Mit einer Tafel und drei Figuren.



YC 10813

Bern

Verlag von A. Francke

1906.



LIBRARY
OF THE
UNIVERSITY OF CALIFORNIA.

Class



2015

Die radioaktiven Substanzen

und

Die Theorie des Atomzerfalles

von

Dr. Paul Gruner

Professor tit. der Physik an der Universität Bern.



Mit einer Tafel und drei Figuren.



Verlag von A. Francke
1906.

GENERAL

QC721

G8

Vorwort.

Die vorliegende Arbeit ist hervorgegangen aus den Vorlesungen, die der Verfasser im Winter 1904/05 und im Sommer 1905 an hiesiger Universität gehalten hat. Sie soll dazu dienen, Studierende und solche, die sich mit den Erscheinungen der Radioaktivität vertraut machen wollen, in dieses interessante Gebiet einzuführen, dabei aber auch einen möglichst vollständigen und doch kurz gefassten Ueberblick über die Gesamtheit der bis in die neuesten Zeiten reichenden Forschungen zu geben.

Diese Arbeit erscheint als wissenschaftliche Beilage zu dem Programm des Freien Gymnasiums in Bern.

Der reichhaltige Stoff ist unter dem Gesichtspunkte der Theorie des Atomzerfalles zusammengestellt. Gewisse Gebiete, wie z. B. die Strahlungen, sind deshalb eher kurz gefasst, andere, wie die physiologischen Wirkungen der Radioaktivität oder wie das Auftreten radioaktiver Substanzen in Quellen etc. sind kaum erwähnt. Dagegen sind die Erscheinungen der induzierten Aktivität etwas eingehender behandelt, und ist überhaupt die amerikanisch-englische Literatur mehr berücksichtigt worden, als dies in der deutschen Fachliteratur bis vor kurzem noch der Fall war.

Bern, im April 1906.

P. G.

Inhalts-Verzeichnis.

	Seite
I. Historische Einleitung	3
II. Die Strahlungen	15
A. Elektronen-Strahlung	15
B. Die β - und γ -Strahlen	19
C. Die α -Strahlen	21
III. Die radioaktiven Substanzen	28
A. Das Uran	29
B. Das Radium und seine Produkte	32
1. Das Radium	32
2. Polonium, Radiotellur, Radioblei	36
3. Die langsamen Umwandlungsprodukte des Radiums	39
C. Das Aktinium und das Emanium	41
D. Das Thorium und das Radiothorium	43
IV. Die Emanation	48
A. Die allgemeinen Eigenschaften der Emanation	48
B. Heliumbildung, Spektrum und Volumen der Emanation	50
C. Das Abklingen der Emanation	55
V. Induzierte Aktivität und Ionenaktivität	57
A. Allgemeine Beziehungen	57
B. Induzierte Aktivität des Thoriums	61
C. Induzierte Aktivität des Radiums	65
VI. Numerische Angaben	72
VII. Die Theorie der radioaktiven Umwandlung	75
A. Theoretisches	75
1. Grundlagen der Theorie	75
2. Zusammenfassung der Theorie	78
3. Konstante Aktivität	79
4. Mittlere Lebensdauer	80
5. Abklingung der induzierten Radiumaktivität	80
B. Numerisches	81
1. Radium und Radium-Emanation	81
2. Die Dauer eines Radiumpräparates	83
3. Die radioaktive Energieabgabe	85
4. Die Gleichgewichtsmengen der einzelnen Umwandlungsstufen des Radiums (Radiotellur)	87
5. Abklingung des Thors und des Urans	89
C. Tabelle der radioaktiven Konstanten	90
VIII. Die Entstehung der radioaktiven Elemente	91
A. Die Bildung des Radiums aus Uran	19
B. Die Evolution der chemischen Elemente	94
Literaturverzeichnis	98

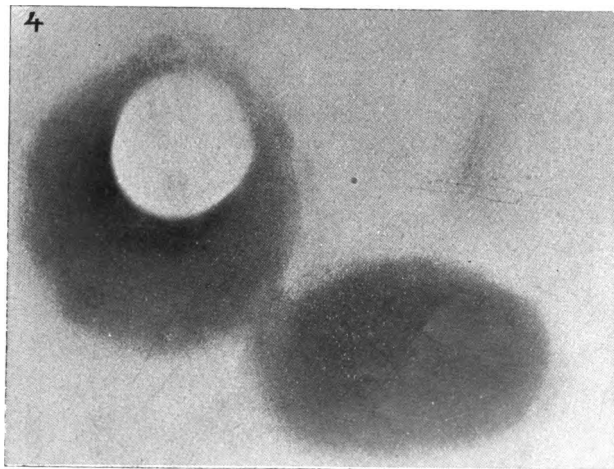
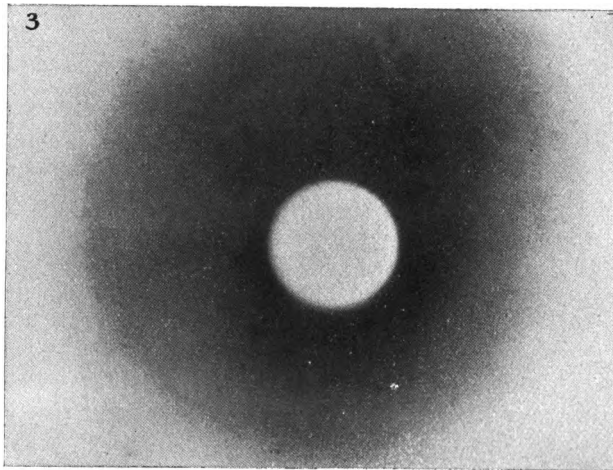
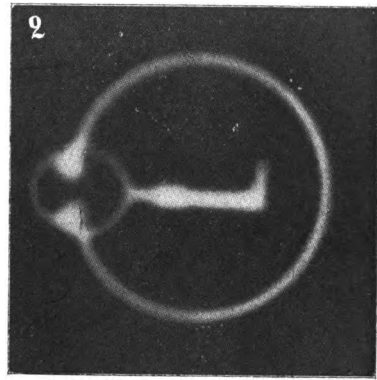
Erklärung der Figuren.

Fig. 1 zeigt eine mit **Röntgenstrahlen** ausgeführte Photographie eines Schlüsselringes, bei 5 Sekunden Exposition.

Fig. 2 zeigt eine mit **Radiumstrahlen** ausgeführte Photographie desselben Schlüsselringes, bei 3 Tagen Exposition, bei 10 cm Abstand des Radiums von der Platte.

Fig. 3 zeigt eine mit **Pechblende** ausgeführte Photographie, bei 18 Stunden Exposition. Die photographische Platte wurde mit einem dünnen Aluminiumblech bedeckt, auf dasselbe eine Münze und dartüber ein Stück Pechblende gelegt. Die β -Strahlen dringen durch das Aluminium und schwärzen die Platte; die Münze absorbiert die Strahlen und gibt den hellen Kreis.

Fig. 4 zeigt in ähnlicher Weise erzeugte, photographische Wirkungen induzierter Aktivität, bei ca. 19 Stunden Exposition. Links oben Kautschuk, der auf eine Münze gelegt wurde, unten ein Stück Papier, rechts oben die reinen Streifen eines Zündhölzchens. Diese drei Körper waren mehrere Tage lang mit Radiumemanation in Berührung gewesen.





Das Atom ist von alters her der Begriff gewesen, an dem sich der Gegensatz des philosophischen Denkens und der naturwissenschaftlichen Auffassungsweise am schärfsten ausprägte. Mit zwingender Logik wurde von der einen Seite darauf hingewiesen, dass ein materieller Körper, so klein er auch angenommen werde, immer noch in Gedanken in unzählige Bruchstücke zerlegt werden könne, dass somit die Existenz von Atomen als unteilbare, materielle Einheiten ein Widersinn sei, — mit unerschütterlicher Beharrlichkeit wurde von der Naturwissenschaft festgehalten, dass jede brauchbare Vorstellung über das Wesen des Stoffes immer wieder das Vorhandensein dieser letzten Bestandteile, der Atome, verlange.

Dieser Gegensatz hat sich allmählich gemildert. Die Naturforscher sind längst der Ansicht, dass ihre hypothetischen Atome in Gedanken noch ins Unendliche teilbar seien — kennt man ja bestimmte Zahlwerte über Grösse und Gewicht der Atome, so dass Bruchteile derselben ohne weiteres denkbar sind. Was die Naturwissenschaft betonte, ist nicht die ideelle Unteilbarkeit der Atome, sondern die reale: keine chemische oder physikalische Kraft im ganzen Universum sollte imstande sein, ein Atom zu zersplittern.

Aber auch diese Annahme, die geradezu als unerschütterliches Axiom aufgefasst wurde, muss heute zu Grabe getragen werden. Die Entdeckungen der Radioaktivität haben derselben den definitiven Todesstoss gegeben. Schon die Erscheinungen der Röntgen- und Kathoden-Strahlen haben unwiderstehlich zu dem Postulat der Existenz von *Elektronen* geführt, jener winzigen, materiellen Teilchen, die einige tausend mal kleiner als die kleinsten Atome sein sollen. Damit war das Atom aus seiner privilegierten Stellung verdrängt. Das Atom ist nicht mehr die letzte Einheit der Materie, sondern das Elektron. Das

Atom ist nicht mehr ein einziges, kompaktes, stoffliches Teilchen, sondern es ist vielleicht eine Ansammlung von Tausenden von winzigen Körperchen, es ist gleichsam ein Sternsystem en miniature, in welchem unzählige Elektronen in wohlgeordneten Bahnen einander umkreisen. Das Atom — und hier setzen die Gesetze der Radioaktivität mit zunehmender Wucht ein — ist aber auch nicht unzerstörbar, sondern es kann sukzessive einzelne Elektronen oder Elektronengruppen aus ihrem gegenseitigen Verbands ausstossen und dadurch einem langsamen, aber sichern Zerfall entgegengehen. Der alte Schulbegriff des chemischen Elementes ist damit umgestürzt, durch den Atomzerfall verwandeln sich die schweren Elemente allmählich in leichtere, eine wirkliche, sprunghafte Evolution lässt das eine aus dem andern entstehen.

Das ist das Bild, das sich, wenn auch erst in schwachen und schwankenden Umrissen aus dem Studium der Radioaktivität enthüllt. Freilich ist damit das Problem des Atoms nicht gelöst, sondern nur verschoben, es ist übertragen auf das Elektron. Hier harren ganz andere, tiefgreifende Fragen der definitiven Erledigung. Das Elektron hat eine bestimmte, wenn auch noch so kleine Masse; aber die theoretischen Arbeiten über jene Masse lassen auf einmal die Ansicht zur Geltung kommen, dass es sich nur um eine scheinbare Masse, nur um eine vorgespiegelte Wirkung elektromagnetischer Beziehungen handle. Sollten diese kühnen Gedankenreihen sich bestätigen, sollte das Atom wirklich nur aus Elektronen aufgebaut sein, sollte das Elektron selber ein massenloses Gebilde elektromagnetischer Natur sein — dann freilich wäre die uralte Frage nach dem Wesen der Materie selber in ein völlig neues Licht gestellt: die Materie wäre nichts anders als eine Form der Energie, — die auf die äusserste Spitze getriebene Atomistik würde zu einem neuen Siege ihrer Gegnerin, der Energetik, führen!



I. Historische Einleitung.

Es sind kaum zehn Jahre verflossen seit der epochemachenden Entdeckung der sog. X-Strahlen durch *Röntgen*. Am 6. Januar 1896 führte derselbe zum erstenmale diese seltsamen Strahlen einem grösseren Kreise von Physikern in Würzburg vor — jene Strahlen, deren Wirkung dem weitem Publikum geradezu gespensterhaft vorkam: war es doch möglich, durch undurchsichtige Wände hindurch zu photographieren und geheimnisvolle Einblicke in das Skelett des lebenden Menschen zu erhalten. — Die Bedeutung, welche diese Röntgenstrahlen später in der praktischen Medizin erlangen sollten, ist hier nicht weiter zu erörtern. Dem Physiker musste eine andere Frage naheliegen: ob es nicht möglich sei, Strahlen von derartiger Durchdringungsfähigkeit auch anderswo zu finden? Wirklich schien es, als ob bald keine Lichtquelle mehr existieren sollte, die nicht in irgend einer Weise rätselhafte Strahlen aussende. Wer die physikalische Literatur jenes denkwürdigen Jahres 1896 durchblättert, findet sich kaum zurecht in dem unsagbaren Material neuer Strahlungsarten, die hier entdeckt sein sollten und von der stets gefügigen photographischen Platte aufgezeichnet wurden. Von all' dem Wirrwar blieb eigentlich nur eine Entdeckung bestehen; diese eine genügte aber, um eine ganze Revolution in unsern physikalischen Anschauungen hervorzurufen.

Es war *Henri Becquerel* in Paris vergönnt, der Pfadfinder auf diesem neuen Wege zu werden.

Schon am 24. Februar 1896 konnte er der Académie des sciences de Paris⁹⁾ eine photographische Platte vorlegen, welche deutliche Spuren von Strahlen aufweist, die ein Krystall von Kaliumuranylsulfat durch eine doppelte Schicht schwarzen Papiers hindurch erzeugt hatte. Am 2. März 1896 erkannte er bereits, dass hier eine Wirkung entdeckt war, die dauernd und

beständig von jenem Uransalz ausgeht, auch wenn dasselbe vor aller äusseren Licht- und Wärmebeeinflussung geschützt war. Um eine blossе Phosphoreszenz konnte es sich also hier nicht handeln; es lag etwas neues, früher nie geahntes vor: Von den Salzen eines bestimmten Elementes, des Urans, geht fortwährend und ganz von selbst eine eigentümliche Strahlung aus, die mit den Röntgenstrahlen nahe verwandt scheint, indem ihre Wirkungen auch durch vollständig undurchsichtige Gegenstände, wie Holz, Metallblätter etc. merkbar wird. Dass aber diese Strahlung einen wirklich dauernden Charakter hat, der — ohne einen Ersatz von aussen zu beziehen — immer in gleicher Stärke vorhanden ist, das zeigte sich im Laufe der Jahre immer klarer; es trat sicher hervor, als *Becquerel* mit denselben Uranpräparaten, die er vom 3. Mai 1896 bis zum 30. März 1903 in absoluter Dunkelheit, in dickwandiger Bleischachtel, aufbewahrt hatte, im Intervall von 7 Jahren Photographien von durchaus unveränderter Deutlichkeit herstellte.

Becquerel unterwarf seine Entdeckung einer weitgehenden, experimentellen Untersuchung. Am 7. März 1896 beobachtete er eine Erscheinung, die für das weitere Studium der Radioaktivität von grundlegender Bedeutung sein sollte, nämlich die *Entladung eines Elektroskopes* durch den Einfluss der von dem Uran ausgehenden Strahlen. Ein Krystall eines Uransalzes wurde in das Gehäuse eines gut isolierenden Elektroskopes hineingelegt; die Blätter desselben wurden durch Aufladen des Knopfes mit Elektrizität zur Divergenz gebracht, aber diese Divergenz blieb nicht bestehen, allmählich näherten sich die Blättchen, nach etwa $1\frac{1}{2}$ Stunden waren sie völlig zusammengefallen, während sie unter gewöhnlichen Umständen stundenlang fast unbeweglich bleiben. Die Uranstrahlen hatten eine langsame Entladung des Elektroskopes verursacht. Jene Beobachtung wurde von klassischer Bedeutung, hat es sich doch gezeigt, dass alle derartigen Strahlen (Röntgenstrahlen inbegriffen) in feinsten Weise durch jenes Mittel nachweisbar sind.

Die Erklärung dieser elektrischen Entladung durch Bestrahlung wurde bald auf Grund einer in jenen Jahren aufblühenden Theorie gefunden: der Theorie der elektrischen Leitung in Gasen, der *Ionisierung der Gase*. Gemäss derselben

kann ein Gas, z. B. die atmosphärische Luft, die Elektrizität nur nach Art einer Salzlösung, d. h. elektrolytisch, leiten. Die einzelnen Gasteilchen sind vollständige Isolatoren, sie zerspalten sich aber (unter Einflüssen, die zum Teil später besprochen werden) in elektrisch geladene, positive und negative Teilchen, in die sog. *Ionen*. Natürlich werden sich die Ionen sofort in Bewegung setzen, wenn in ihrer Nähe ein elektrisch geladener Körper sich befindet; die gleichnamigen Ionen werden abgestossen und eilen hinweg, die ungleichnamigen werden kräftig angezogen, bis sie zu dem geladenen Körper gelangen. Befindet sich z. B. ein negativ geladenes Elektroskop in der Luft, so werden die spärlich vorhandenen positiven Ionen der Luft gegen das Elektroskop hineilen, durch ihre Ladung einen Teil der Elektroskopladung neutralisieren, also dasselbe langsam entladen. Die Luft wirkt somit auf das Elektroskop wie ein Körper von sehr schwachem elektrischen Leitvermögen. Sind aus irgend einem Grunde mehr Ionen in der Luft, so geht der Prozess der Entladung rascher vor sich, und wenn die Ionenzahl besonders gross ist, so kann das Elektroskop in kürzester Zeit entladen werden, die Blättchen klappen sichtbar zusammen.

Das Elektroskop und in viel feinerer Weise das Elektrometer kann deshalb ein direktes Mass des Ionengehaltes der umgebenden Luft liefern. Die Geschwindigkeit der Entladung gibt sofort den Grad der Luft-Ionisierung an. Da aber, nach *Becquerels* Untersuchung, die Uranstrahlen (und auch alle andern ähnlichen Strahlen) die Luft ionisieren und zwar um so kräftiger, je grösser ihre Intensität ist, so dienen die Messungen an Elektroskop oder Elektrometer zur quantitativen Bestimmung der Strahlungsintensität.

Innerhalb weniger Monate hatte *Becquerel* diese fundamentalen Eigenschaften gefunden. Er war der Entdecker der ersten radioaktiven Substanz, des *Urans*; denn es bedurfte keiner langen Zeit, um nachzuweisen, dass die Strahlen der Uransalze ihre Ursache im Element Uran selber haben, um so mehr, als das metallische Uran in besonderer Weise kräftig strahlt.

Von ihm gehen die Strahlen aus, deren Vorhandensein in dreifacher Weise nachweisbar ist:

1. Durch ihre *photographische Wirkung*.
2. Durch ihre *Fluoreszenzerregung*, d. h. durch ihre Fähigkeit, einen Schirm, der mit passenden Substanzen (z. B. Bariumplatinocyanür) bestrichen ist, im Dunkeln zum Leuchten zu bringen.
3. Durch die *Ionisierung der Luft*.

Diese drei Eigenschaften sind seither stets als die charakteristischen Erscheinungen dieser Strahlen betrachtet worden; *eine Substanz, die spontan und permanent derartige Strahlen von sich gibt, wird als radioaktiv bezeichnet.*

Selbstverständlich drängten diese Entdeckungen *Becquerels* zu weitem Forschungen. Sollte wohl das Uran das einzige Element unseres Erdenballes sein, das jene Strahlen erzeugt? Ueberall wurde nach andern radioaktiven Elementen gefahndet, sie liessen sich jedoch nicht so leicht finden.

Erst im Jahre 1898 wurde fast gleichzeitig an zwei verschiedenen Orten, nämlich von *G. C. Schmidt*⁹⁾ in Erlangen (4. April) und von Frau *S. Curie*⁴⁾ in Paris (12. April) entdeckt, dass auch die *Thoriumsalze* und *Thoriummineralien* in ganz ähnlicher Weise wie das Uran Strahlen aussenden.

Die Untersuchungen, welche damals Herr *P. Curie* (dessen unerwarteter Tod am 19. April 1906 von der ganzen wissenschaftlichen Welt tief betrauert wird) und Frau *S. Curie* in Paris ausführten, sollten aber eine ganz andere Tragweite haben. Sie hatten in geistreicher Weise eine elektrometrische Beobachtungsmethode gefunden, die es gestattete, die geringsten Veränderungen der Ionisierung der Luft genau zu messen. Mit ihren Apparaten untersuchten sie alle ihnen zugänglichen chemischen Elemente und Mineralien aus verschiedenen Sammlungen und fanden bald, dass nur uran- oder thoriumhaltige Mineralien radioaktiv wirksam seien. Auffallend war aber die Tatsache, dass einzelne dieser Gesteinsarten ein Strahlungsvermögen aufweisen, das weitaus intensiver ist, als dasjenige der gleichen Gewichtsmengen Uran oder Thorium. Besonders kräftig zeigte sich ein Gestein aus dem Erzgebirge, die Uranpechblende (aus Johanngeorgenstadt in Sachsen oder aus Joachimsthal in Böhmen). Dass in diesen Mineralien die Radioaktivität des Urans verstärkt sei, war nicht wohl denkbar; eher war zu vermuten, dass hier ein neuer,

unbekannter Körper verborgen sein müsse, dessen Strahlung bedeutend stärker ist als diejenige des Urans oder des Thors.

Mit grösstem Geschick suchten die beiden Forscher diese neue Substanz aufzufinden, und nach monatelanger Arbeit (28. Juli 1898) gelang es ihnen, wirklich ein neues Element (und zwar das untersalpetersaure Salz desselben) aus der Pechblende abzusondern. In Erinnerung an die Nationalität der Entdeckerin wurde das neue Element, das vorläufig nur durch seine Strahlung nachweisbar war, *Polonium* genannt.

Den scharfsinnigen Beobachtern entging es jedoch nicht, dass bei der chemischen Bearbeitung der Pechblende der von dem Polonium abgeschiedene Rückstand immer noch ein erhebliches Strahlungsvermögen besass. Mit frischem Eifer suchten sie nach der Ursache desselben. Am 26. Dezember 1898 konnten sie mit einer neuen Entdeckung vor die Académie des sciences treten. Ein zweites Element war aus der Pechblende gewonnen worden; dasselbe (obgleich nur in unmessbar geringen Mengen vorhanden) zeigte eine überraschend hohe Radioaktivität, es war geradezu das strahlende Element par excellence, es wurde *Radium* genannt.

Es ist nicht möglich, den weiteren Verlauf der Entwicklung der Radioaktivität hier historisch genau zu verfolgen. Die unscheinbare Quelle kleiner Entdeckungen wuchs zu einem reissenden Strome, der unsere ganze moderne Physik umzuwälzen droht. Die drei bis vier folgenden Jahre hielten die Physiker in beständiger Spannung.

Seltam waren die *Strahlen*, die aus jenen winzigen Krystallen der Radiumsalze ausgingen. Sie dringen durch alles hindurch und gestatten photographische Aufnahmen nach Art der Röntgenbilder, nur wesentlich verschwommener (s. Fig. 1 und 2 auf der beigelegten Tafel). Sie führen elektrische Ladungen mit sich, sie werden grösstenteils von magnetischen Kräften aus ihrer geraden Bahn in Kreislinien abgelenkt. Kräftig ist ihre Fluoreszenzerregung, hell leuchten die dunkeln Bariumplatinocyanür-Schirme unter ihrer Bestrahlung auf. Sie ionisieren die Luft und zwar so stark, dass das Elektrometer imstande ist, die Anwesenheit von Radiummengen nachzuweisen, die der feinsten chemischen Analyse, ja sogar der Spectralanalyse total entgehen. Beständig geht diese Strahlung von dem Radiumsalz aus,

wahrscheinlich besteht sie aus materiellen Körperchen, das Radium verliert also unausgesetzt Materie — und doch liess sich keine Gewichtsabnahme konstatieren (siehe die Arbeiten von *Heydweiler, Dorn, Rutherford, Voller, Eve*¹⁰), deren Diskussion freilich noch nicht abgeschlossen ist).

Aber grösser als diese Stoffverluste ist die fortwährende Produktion von Energie, die von den radioaktiven Substanzen ausgeht. Mag man ein Radiumsalz monatelang in gleichmässiger Temperatur, in absoluter Dunkelheit, in dickwandigen Bleikapseln eingeschlossen, aufbewahren, nach wie vor zeigt dasselbe eine deutliche Fluoreszenz, beständig sendet es ein mattes Licht aus, beständig erzeugt es Wärme, — so viel, dass seine Temperatur diejenige der Umgebung um einige Grade übertreffen kann, so viel, dass 1 Gramm Radium Stunde für Stunde 100 Gramm Calorien abgibt (genügende Wärme, um einen Deziliter Wasser um 1° C. zu erwärmen), — stetsfort elektrisiert sich das Radiumpräparat; und dies alles geschieht von selbst, ohne äussere Beeinflussung, und dauernd, ohne dass irgend eine Abnahme dieser Wirkungen je beobachtbar geworden wäre.

Doch nicht genug: Am 6. November 1899 publizierten Herr und Frau *Curie* eine neue Entdeckung. Jene Eigenschaft der Strahlenausendung, die Radioaktivität, ist nicht auf Radium und Polonium und die wenigen ähnlichen Substanzen beschränkt, sondern sie ist auf andere, ja auf jeden beliebigen Körper übertragbar. Bringt man in ein grösseres Gefäss, das wohlverschliessbar ist, eine kleine Schale mit einigen mm³ einer Radiumsalzlösung und legt (einige Wochen später) beliebige Gegenstände wie Papier, Glas, Holz, Metalle, auch Flüssigkeiten etc. in das Gefäss, so zeigt sich, dass alle diese Körper nach Herausnahme aus demselben vollständig die Eigenschaften des Radiums angenommen haben; sie senden Strahlen aus, die durch Metallblättchen hindurch schwärzend auf die photographische Platte wirken, die helle Fluoreszenz erregen, die kräftig die Luft ionisieren; kurzum sie besitzen sog. *induzierte Aktivität*, die in jeder Weise der Aktivität ursprünglich radioaktiver Körper entspricht, die aber sehr hohe Werte erreichen kann, einige tausend mal kräftiger als diejenige des Urans. Wie sich später zeigte, ist diese induzierte Aktivität selbst

wieder übertragbar; *Elster* und *Geitel*¹¹⁾ nahmen einen induziert aktiven Kupferdraht und rieben ihn mit einem Lederlappen, der mit Ammoniak befeuchtet war, ab: der Lederlappen zeigte sich nun deutlich aktiv und auch nach scharfer Erhitzung behielt er diese Aktivität bei; sie war noch stark genug, um durch Aluminiumblech hindurch eine deutliche Schwärzung einer photographischen Platte zu erzeugen.

Doch unterscheidet sich diese induzierte Aktivität sehr leicht von der primären Radioaktivität der ursprünglich aktiven Substanzen wie Radium, Uran, Thor. Während die letztere durch ihre (scheinbare) Unvergänglichkeit sich auszeichnet, ist erstere nur von kurzer Dauer. Der frisch induzierte Gegenstand zeigt starke Aktivität, unter Umständen nimmt dieselbe zunächst noch zu, dann aber beginnt mit absoluter Sicherheit eine Abnahme, die Ionisierung der Luft wird immer schwächer, die Radioaktivität verschwindet. Wie eine laut angeschlagene Glocke ihre Schwingungen immer leiser erzittern lässt, so klingt die induzierte Aktivität allmählich ab, bis kaum mehr eine merkbare Spur vorhanden ist. Dieses Abklingen, das nach ganz bestimmten Gesetzen erfolgt, wird später eingehend besprochen werden.

Nicht nur das Auftreten der induzierten Aktivität und ihr Abklingen bildete eine der unerklärlichsten Beobachtungen der Radioaktivität, sondern auch die Art und Weise ihrer Entstehung schien höchst rätselhaft. Es wäre ja denkbar gewesen, dass die von dem Radium ausgeschleuderten Partikeln, die das Wesen seiner Strahlung bilden, auch jene übertragene Aktivität vermitteln — aber es zeigte sich im Gegenteil, dass die Strahlung hier ganz ausser Betracht fällt. Die Gegenstände, welche in das die Radiumlösung enthaltende Gefäss gelegt werden, werden nämlich alle vollkommen gleich stark radioaktiv, ob sie in der Nähe des Radiums oder weit entfernt von demselben sich befinden, ob sie dicht über der strahlenden Radiumlösung oder weit unter derselben, ja ob sie durch dicke Bleiplatten vor jeder Strahlung geschützt seien oder nicht. Andererseits tritt keine Spur von induzierter Aktivität auf, wenn die Radiumlösung hermetisch abgeschlossen oder gar in eine Glasröhre eingeschmolzen ist, obgleich die Strahlen die Glaswand mit Leichtigkeit durchdringen; sowie aber das betreffende

Gefäß die geringsten Spalten oder Löcher hat, wird ein benachbarter Körper deutlich radioaktiv.

Diese Beobachtung, die in Verbindung mit ähnlichen Untersuchungen, Ende 1899 und anfangs 1900 von verschiedenen Forschern gemacht wurde (Rutherford, Curie, Dorn¹²) etc.), zeigte, dass hier wieder ein neuer Faktor bestimmend auf den Gang der Versuche einwirkte. Dieses unbekanntes Etwas, welches die Entstehung der induzierten Aktivität vermittelt, hat offenbar die Eigenschaft, sich langsam aus der ursprünglichen, radioaktiven Lösung zu entwickeln, im ganzen Raume sich auszubreiten, durch alle Poren und Ritzen hindurchzudringen, allmählich alle Zimmer und Räume erfüllend. Es ist ein unfassbares Ding, das überall durch seine eigene Strahlung beobachtbar ist, das überall, wo es mit materiellen Körpern in Berührung kommt, ihnen die Eigenschaft der Radioaktivität verleiht; jedenfalls handelt es sich um eine Energieform, vielleicht sogar um ein feines Gas; *Rutherford* in Montreal¹⁾), - einer der bedeutendsten Radiumforscher, nannte es *Emanation*.

Diese Emanation muss ein direktes Produkt der radioaktiven Elemente sein, beständig entsteht sie aus ihnen, während Wochen, Jahren, wahrscheinlich Jahrhunderten. Sie ist die Vermittlerin der induzierten Aktivität, sie ist aber selber radioaktiv: wenn solche Emanation in ein Glasgefäß eingedrungen ist und dasselbe wird zugeschmolzen, so wirkt es nunmehr wie eine schwache, radiumhaltige Zelle. Doch bleibt ein wichtiger Unterschied bestehen: die Emanation ist, wie die induzierte Aktivität, nicht dauernd aktiv. Ihre Strahlung nimmt ab, sie klingt nach genau bestimmten Gesetzen ab, nach mehreren Tagen (höchstens einigen Wochen) ist die Aktivität eines solchen Emanationsgefäßes völlig verpöchtet und mit ihr ist die Emanation spurlos verschwunden.

Unausgesetzt entwickelt sich Emanation aus einer Radiumlösung, ebenso unausgesetzt verschwindet sie wieder! Wäre es denkbar, dass ein solches Agens ein eigentliches Gas sei, aus wirklichen, materiellen Molekülen bestehend? Und wenn sie kein Gas ist, woraus besteht sie dann? Das Problem der Radioaktivität war in ein akutes Stadium getreten, das 20. Jahrhundert begann für die Physik mit einer Fülle mysteriöser, mit gewohnten Anschauungen unvereinbarer Tatsachen.

Und doch sollte gerade die Entdeckung der Emanation und der induzierten Aktivität der Ariadnefaden sein, der den Ausweg aus diesem Labyrinth andeutete.

Herrschte anfangs die Ansicht vor, dass die Radioaktivität nur eine Art Phosphoreszenzerscheinung sei, in dem Sinne, dass z. B. das Radium imstande sei, irgend eine unbekannte, das ganze Weltall durchdringende Strahlung aufzufangen und deren unsichtbare Energie beständig in beobachtbare Energieformen umzuwandeln, so neigte man allmählich einer andern Auffassung zu. *E. Rutherford* und *F. Soddy*¹⁸⁾ waren die ersten, welche a. 1902 es wagten, die *Emanation als ein wirkliches, materielles Gas* anzusehen und anknüpfend daran die Vermutung auszusprechen, dass die *Radioaktivität ein Prozess sei, der sich innerhalb des Atomes selber abspiele*, so dass wir hier zum ersten male in der Lage seien, einen Blick in Vorgänge zu werfen, die bisher den feinsten Beobachtungsmethoden unzugänglich geblieben waren.

Mit grossem Geschick, gestützt durch sinnreiche Berechnungen und feine Versuche hat *Rutherford* diese Theorie durchgearbeitet und verteidigt, so dass sie gegenwärtig allgemein als die brauchbarste Hypothese über das Wesen der Radioaktivität anerkannt wird.

Die Atome der radioaktiven Elemente, des Urans, des Thoriums, des Radiums, welche 238, resp. 232, resp. 225 mal schwerer sind als das Wasserstoffatom, werden als eine Ansammlung zahlloser, feiner Korpuskeln angesehen, die mit unüberwindlicher Gewalt zu einem unauflöselichen Verbände vereinigt sind. Keine Gluthitze, keine elektrische Wirkung, keine chemischen Reagentien vermögen diese Bande zu sprengen, so dass das Atom immer als letzter, unteilbarer Rest der Materie auftrat. Doch was keiner äussern Kraftwirkung möglich ist, das leistet das Atom von selbst. Wie von unsichtbarer Hand ergriffen, löst sich auf einmal eines oder mehrere der Korpuskeln aus den alten Fesseln und leitet damit den Zertrümmerungsprozess des ganzen Atomes ein. Mit Explosionskraft reisst sich die Korpuskel los, Wärme wird erzeugt, Licht ausgesendet, Elektrizität tritt auf, die Luft wird durch den Anprall ionisiert, d. h. alle Erscheinungen der Radioaktivität machen sich geltend. Der noch übrig bleibende Atomkomplex

löst sich als neues, gasförmiges Atom von den andern und entweicht als Emanation aus der ursprünglichen Masse. Doch der Atomzerfall geht unaufhaltsam weiter: neue Korpuskeln werden von dem Emanationsatom abgesprengt, so dass auch die Emanation radioaktive Wirkungen zeigt; die Restatome schlagen sich an den benachbarten Körpern nieder und erzeugen dort die induzierte Aktivität, indem auch dort der Auflösungsprozess des Atoms vollführt wird; beständig stürzen vereinzelt Korpuskeln in den umgebenden Raum, beständig äussert sich dadurch die induzierte Radioaktivität, bis endlich die zurückbleibenden Korpuskeln einen neuen Gleichgewichtszustand gefunden haben und ein neues, stabiles Atom gebildet wurde, das nicht mehr radioaktiv ist.

Von Umwandlungsstufe zu Umwandlungsstufe geht das Radiumatom einer neuen Atombildung entgegen, jeder dieser Umwandlungsprozesse ist von den eigenartigen korpuskularen Strahlungen und der damit zusammenhängenden Energieaussendung begleitet — das ist, nach *Rutherfords* Hypothese, *das Wesen der Radioaktivität*. Freilich steht diese Theorie noch in ihren ersten Anfängen, noch manche Frage bleibt unbeantwortet, manche Erscheinung steht noch als ungelöstes Rätsel vor uns.

*
*

Während durch *Rutherford's* Arbeiten die Probleme der Radioaktivität eine klare, theoretische Grundlage zu erhalten begannen, dehnte sich das Forschungsgebiet nach einer andern Seite wieder ins Ungemessene hinaus.

Elster und *Geitel* in Wolfenbüttel, die unermüdlichen Forscher im Gebiete der Lufterlektrizität, fanden a. 1901¹¹⁾, dass ein Körper durch blosser, längere Berührung mit der atmosphärischen Luft induzierte Aktivität aufnehmen kann. Allerdings muss der Körper, wenn dieselbe merklich werden soll, eine grosse Oberfläche besitzen und auf ein hohes, negatives Potential geladen sein. Es wurden deshalb lange Metalldrähte verwendet, die, isoliert aufgehängt und auf einige 1000 Volt negativ geladen, mehrere Stunden lang frei in der Luft weilten. Solche Drähte waren nachher deutlich aktiv, und ihre Aktivität klingt in ganz ähnlicher Weise ab, wie diejenige der Radiumaktivität. Es war keine andere Erklärung

möglich, als die Annahme, dass in der atmosphärischen Luft beständig ein geringes Quantum Emanation vorhanden sei, das sich in induzierte Aktivität umsetzt. Wenn aber in der Atmosphäre stets Emanation nachweisbar ist, andererseits aber jede Emanation im Laufe weniger Wochen völlig verschwindet, so muss irgendwo eine Quelle bestehen, welche fortwährend Emanation liefert. Wo anders als im *Erdboden* konnte dieselbe zu finden sein? — Diese Erwartung wurde nicht getäuscht. Luft, die aus einer Tiefe von einigen Metern aus dem Erdboden heraus gepumpt wurde, erwies sich als bedeutend emanationshaltig; als nun grössere Stücke des Erdbodens selber auf ihre Radioaktivität hin geprüft wurden, zeigte sich in der Tat, dass die gewöhnliche Erde, speziell aber gewisse tonhaltige Erden, in minimalen Mengen Spuren von primären, radioaktiven Substanzen enthalten. Diese Beobachtungen wurden bald allseitig wiederholt, es bestätigte sich, dass jenes Element, das Radium, das so ausserordentlich selten ist (1 mgr reines Radiumbromid hat einen Verkaufswert von etwa 400 Fr.), eigentlich überall, über die ganze Erdoberfläche hin zerstreut, vorkommt — natürlich in so unmessbar geringen Quantitäten, dass von einer Gewinnung desselben aus gewöhnlicher Erde nicht die Rede sein kann. Interessant waren die Entdeckungen jener Materialien und Orte, an denen Emanation in grösserer Menge auftrat. Vorerst wurde beobachtet, dass ein gewisser vulkanischer Schlamm, der Fango di Battaglia (dessen Heilwirkungen mehrfach anerkannt werden) relativ grössere Mengen Radium enthalte¹⁴⁾ (natürlich handelt es sich auch da noch um ausserordentlich geringe Mengen; die Aktivitäten der gewöhnlichen Ackererde, des Fango, des Urans und der Pechblende, auf gleiche Massen bezogen, verhalten sich ungefähr wie 0,34 : 1 : 118 : 1180; es müssten also wenigstens 1180 Tonnen Fango bearbeitet werden, um nur 1 gr Radium abzuscheiden). Sukzessive wurden dann die verschiedenen *Thermalquellen* Deutschlands, Frankreichs, Oesterreichs, der Schweiz etc. untersucht und meist ein deutliches Auftreten von Emanation nachgewiesen; besonders radioaktiv ist die Murquelle in Baden-Baden, in der Schweiz sind die Quellen in Baden, Ragaz, Leuk etc., radiumhaltig¹⁵⁾, ja auch die heissen Wasserströme des Simplontunnels¹⁶⁾ zeigten merk- baren Emanationsgehalt, endlich ergab sich, dass fast jedes

Leitungswasser, sowie Petrol- und andere Oelquellen Spuren von Radioaktivität mit sich führen¹⁷⁾, kurzum es öffnete sich ein enormes Arbeitsfeld, dessen praktische Bedeutung wohl erst mit der Zeit recht klar werden wird.

Dasselbe Problem der Radioaktivität der Luft und des Erdbodens wurde besonders von amerikanischer Seite in etwas anderer Weise in Angriff genommen. Wenn der ganze Erdboden von radioaktiven Elementen durchsetzt ist, wenn die Luft überall Emanation mit sich führt, dann muss die vereinigte Wirkung all' dieser Substanzen eine ziemlich erhebliche, *alles durchdringende Strahlung* erzeugen, die unsern ganzen Planeten erfüllt. Wirklich ergab sich aus Versuchen von *Cooke*¹⁸⁾ und andern, dass in vollständig abgeschlossenen Gefässen stets Spuren von ionisierter Luft vorhanden sind, dass aber der Grad dieser Ionisierung abnimmt, wenn das Gefäss in eine dicke Bleihülle gesteckt wird, d. h. eben, wenn der Einfluss jener universellen, sehr durchdringlichen Strahlung durch die Bleiwände gehemmt wird.

Wiederum war zu erwarten, dass die überall spurweise auftretende Emanation an jedem Gegenstande eine geringe, indirekte Aktivität erzeuge, deren Wirkung auf ein äusserst feines Elektroskop merkbar sein muss. Endlich ist nach der Theorie des Atomzerfalles von *Rutherford* nicht einzusehen, warum gerade nur das Radium, das Uran, das Thorium etc. umwandlungsfähige Atome haben sollten, und warum nicht alle Elemente, wenn auch in sehr verschiedenem Grade, in einem Entwicklungsprozess begriffen sein könnten, so dass eigentlich *jeder Körper mehr oder weniger radioaktive Wirkungen* zeigen müsste. Nach einer neueren Arbeit von *N. R. Campbell*¹⁹⁾, der sich auf eigene und fremde Beobachtungen²⁰⁾ stützte, scheint wirklich diese Vermutung bestätigt zu sein; bei einer Reihe von Metallen, besonders Blei, Kupfer, Aluminium, Zinn, Silber, Eisen, sind tatsächlich solche Andeutungen radioaktiver Strahlungen gefunden worden. Wie weit diese Beobachtungen sich bestätigen werden, bleibt der Zukunft überlassen; jedenfalls stehen wir hier vor einer Fülle interessanter Fragen, die in den nächsten Jahren eine Lösung finden könnten.

II. Die Strahlungen.

A. Elektronen-Strahlung.

In stark verdünnten Gasen treten bekanntlich neben dem Einfluss elektrischer Entladungen die sog. *Kathodenstrahlen* auf, deren Studium besonders von *W. Crookes* a. 1874⁷⁾ gefördert wurde. Von der Kathode, d. h. von derjenigen Metallplatte, die mit dem negativen Pole der Elektrizitätsquelle verbunden ist, geht ein unsichtbares, geradlinig sich ausbreitendes Strahlenbündel durch die ganze Röhre; wo dasselbe auf Glas, auf Salze der Alkalien, auf bestimmte Mineralien auftrifft, da leuchten dieselben in intensiven Farben auf, sie fluoreszieren. Bekannt sind die Schattenwirkungen, die ein in die Bahn der Kathodenstrahlen gebrachter Körper erzeugt, ihre chemischen Wirkungen, die namentlich Anlass zu den sog. Nachfarben der Haloidsalze geben (Kochsalz wird blauviolett gefärbt), ihre Wärmewirkung, die so stark ist, dass ein in ihre Bahn gestelltes Metallblech glühend wird, ja sogar schmilzt. Wichtig war die Entdeckung von *Hertz* und *Lenard*, wonach Kathodenstrahlen durch sehr dünne, aber undurchsichtige Metallblättchen hindurchdringen; denn dieselbe war der Vorläufer zu allen weitern Entdeckungen auf diesem Gebiete neuer Strahlungen, bereits offenbarte sich hier eine Aehnlichkeit mit den *Röntgenstrahlen*, die ja ihrerseits überall entstehen, wo Kathodenstrahlen von einem festen Körper (der sog. Antikathode) aufgehalten werden.

Crookes bildete sich eine eigenartige Theorie dieser Strahlen. Abweichend von allen damals geltenden Anschauungen erblickte er in den Kathodenstrahlen keine Aetherwellen, sondern eine Aussendung wirklicher, materieller Teilchen, sog. *Korpuskeln*, die, mit riesiger Gewalt von der Kathode weggeschleudert, Anlass zu den eben erwähnten Erscheinungen geben sollten. Ueber diese Theorie wurde damals einfach zur Tagesordnung geschritten — jetzt, nach 20 Jahren, erlebt der geniale Physiker die Genugtuung, dass sein Traum erfüllt, dass mit ungeteilter Einhelligkeit seine Theorie in ihren Grundgedanken als die einzig richtige anerkannt wird.

Diese neue Anschauung, die unter dem Namen *Elektronentheorie* bekannt ist, muss hier in ihren Hauptzügen dargelegt werden.

Schon seit langem hat die Theorie der Elektrolyse den Begriff des *Ions* aufgestellt. In einer Lösung, z. B. von NaCl in Wasser, sind die gelösten NaCl-Moleküle grösstenteils dissoziiert, aber die einzelnen Atome des Na und des Cl dürfen dabei nicht als elektrisch neutral aufgefasst werden, sondern jedes Na-Atom führt eine positive elektrische Ladung, jedes Cl-Atom eine negative Ladung mit sich; solche elektrisch geladene Atome werden als Ionen bezeichnet. Das Studium dieser Ladungen hat dazu geführt, denselben ein eigenes, materielles Dasein zuzuschreiben und damit den kühnen Schritt zu wagen, die Elektrizität selber zu materialisieren. Diese Ladung, welche das einzelne Atom beständig mitträgt, hat sich nämlich bei allen Messungen als konstant erwiesen, so dass man geradezu gezwungen ward, ihre vom Atom unabhängige Existenz anzuerkennen und sie gleichsam als Uratom der Elektrizität zu betrachten. Ein solches, für sich bestehendes Uratom der Elektrizität heisst *Elektron*; durch Anheften eines derartigen Elektrons an ein elektrisch neutrales Atom wird dasselbe geladen und ist nun nicht mehr ein gewöhnliches Atom, sondern ein *Ion*.

Möglicherweise ist jedes Atom selber eine blosser Anhäufung eng verbundener Elektronen, und je nachdem ein Ueberschuss oder ein Mangel an negativen Elektronen in demselben besteht, erscheint das Atom als negatives oder als positives Ion. Eine wirkliche Existenz haben überhaupt nur die *negativen Elektronen*, die demnach das Wesen der Elektrizität selber darstellen; ob es auch positive Elektronen gibt, oder ob nur die Abwesenheit negativer Elektronen eine positive Elektrisierung bedeutet, ist zur Stunde noch nicht klargelegt. Ueber die negativen Elektronen, die in allen Körpern dieselbe Natur und Dimension haben, lassen sich ziemlich genaue Messungen vornehmen. Ein solches Elektron führt eine Ladung von ca. $3,2 \cdot 10^{-10}$ elektrostatische Elektrizitätsmengeneinheiten, also ca. $1,07 \cdot 10^{-19}$ Coulomb, mit sich; seine Masse ist nur ein bis zwei Tausendstel der Masse eines Wasserstoffatoms! Die Bestimmung derselben war wie eine neue Offenbarung für die moderne Physik und Chemie, war doch damit das Atom de-

finitiv seines Monopols, der kleinste, unteilbare Rest der Materie zu sein, beraubt! Zu welchen weitem Ueberraschungen das Studium der Dynamik des Elektrons führte, und welche metaphysische Bedeutung diese Fragen besitzen, wurde früher erwähnt.

Diese modernste Theorie hat nach und nach verschiedene Gebiete der Elektrizitätslehre erobert. Hier interessiert sie uns nur insoweit, als sie mit den Strahlungserscheinungen in Zusammenhang steht. Es bedarf keiner tiefgründigen Ueberlegung, um einzusehen, dass die von *Crookes* ausgedachten Korpuskeln, deren Bombardement die *Kathodenstrahlen* bilden sollten, nichts anderes sind als negative Elektronen, die an der Kathode angehäuft sind und durch den Einfluss des hohen, elektrischen Potentials in den luftleeren Raum ausgeschleudert werden. Die Geschwindigkeit, mit welcher diese Teilchen ausstrahlt werden, lässt sich durch Versuche bestimmen. Auch hier treten erstaunliche Zahlen auf; je nach den Versuchsanordnungen ergeben sich Geschwindigkeiten von 22,000 bis 70,000 km in einer Sekunde — Zahlen, die sich schon der Lichtgeschwindigkeit (300,000 km in einer Sekunde) nähern.

Selbstverständlich besitzen die Elektronen infolge dieser enormen Geschwindigkeit eine merkliche Energie, so dass beim Aufprallen auf die Antikathode eine beträchtliche Hitze entsteht. Dabei wird aber auch der Aether zu eigentümlichen Impulsen angeregt; von der Antikathode eilen nach allen Seiten Wellen fort, deren äusserst kleine Wellenlänge ihnen die Fähigkeit gibt, auch die kompaktesten Massen zu durchdringen. Es sind dies die *Röntgenstrahlen*, die somit bis zu einem gewissen Grade in das Gebiet der Aetherwellen gehören, wenn sie auch nicht aus regelmässigen Schwingungen bestehen. Nach *Haga* und *Wind*²¹⁾ soll ihre Wellenlänge höchstens ein bis zwei Zehnmillionstel mm betragen.

Sind die Kathodenstrahlen wirklich Strahlen ausgeschleudert, negativer Elektronen, so müssen elektrische und magnetische Kräfte ihren Verlauf merkbar beeinflussen. Die Uebereinstimmung der diesbezüglichen Versuche mit den theoretischen Erfordernissen ist wohl eine Hauptstütze der ganzen Elektronentheorie. Die wesentlichen Erscheinungen sind folgende:

Wird ein homogenes, magnetisches Kraftfeld senkrecht zu der Richtung des Kathodenstrahlenbündels erregt, so biegen

sich dieselben in schöner Kreisbahn um die Kraftlinien herum. Erzeugt man ein homogenes, elektrostatisches Kraftfeld (etwa zwischen Kondensatorplatten), so werden die senkrecht zu den Kraftlinien erzeugten Kathodenstrahlen in parabolischen Bahnen abgelenkt. Fängt man die Elektronen jener Strahlen in passender Weise in einem isolierten Metallgehäuse auf, so wird dasselbe negativ geladen, ein deutlicher Beweis dafür, dass die Kathodenstrahlen wirklich aus negativen Korpuskeln bestehen. Freilich tritt bei diesen letzteren Messungen eine andere Haupteigenschaft der Strahlen oft störend auf: es ist die Ionisierung der Gase. In hohem Grade haben die Kathodenstrahlen ein solches Ionisierungsvermögen; es ist dies nicht zu verwundern, denn die schnell hinstürzenden Elektronen prallen beständig auf Gas-moleküle auf und zersprengen dieselben infolge des heftigen Stosses in ihre Bestandteile, d. h. in positive und negative Ionen.

Gerade diese elektromagnetischen Erscheinungen, in Verbindung mit calorischen Bestimmungen, haben die Möglichkeit gegeben, numerische Werte über die Elektronen zu erhalten.

Zwei Grössen sind in verhältnismässig einfacher Weise zu ermitteln: die *Geschwindigkeit* v , mit welcher die Kathodenstrahlen ausgesandt werden, und das Verhältnis e/m der Ladung e eines Elektrons zu seiner Masse m , resp. die *spezifische Ladung* der Kathodenstrahlen. Hierbei ist der Wert von e als bekannt vorausgesetzt, da angenommen wird, dass alle Elektronen (wenigstens die negativen) stets in elektrischer Beziehung vollständig gleich sind. Aus e und e/m ist dann m zu berechnen und nach einer angenäherten Formel auch der Durchmesser a des Elektrons zu bestimmen, $a = \frac{2 e v}{3 m}$.

Nach Angaben von *Simon*²²⁾ gelten für ziemlich rasche Kathodenstrahlen:

$$v = 0,7 \cdot 10^{10} \frac{\text{cm}}{\text{sec}} = 70,000 \text{ km in einer Sekunde}$$

$$e/m = 1,865 \cdot 10^7 \frac{\text{el. magn. Einheiten}}{\text{gr}}$$

Unter Annahme, dass $e = 3,2 \cdot 10^{-10}$ el. stat. oder $1,07 \cdot 10^{-20}$ el. magn. Einheiten sei, folgt eine Masse $m = 0,6 \cdot 10^{-27}$ gr und ein Durchmesser $a = 1,3 \cdot 10^{-13}$ cm, d. h. das negative Elektron hat eine Masse von ungefähr der Hälfte

eines Quadrillionstel mgr und einen Durchmesser von etwas mehr als ein Billionstel mm.

Zum Vergleich seien die Zahlen für ein Atom Wasserstoff gegeben: $e/m = 9600$, daraus folgt $m = 1,12 \cdot 10^{-24}$ gr, d. h. etwa 1000 Quadrillionstel mgr, ferner $a = 10^{-8}$ cm, d. h. ein Zehnmillionstel mm. Das Wasserstoffatom wäre demnach 2000 mal schwerer als das negative Elektron, mit einen 100,000 mal grösseren Durchmesser.

Mit dem Auftreten von Kathodenstrahlen muss noch ein Phänomen verbunden sein. Wenn nämlich diese Strahlen negative Elektronen mit sich führen, so muss notwendigerweise irgendwo eine entsprechende positive Ladung zurückbleiben, und die damit versehenen Atome müssen in entgegengesetzter Bahn wie die Kathodenstrahlen bewegt werden. Solche Strahlen treten wirklich auf: es sind die von *Goldstein* entdeckten *Kanalstrahlen*. Nimmt man als Kathode eine mit feinen Kanälen durchlöchernte Platte, so treten nicht nur auf ihrer der Anode zugewandten Seite die Kathodenstrahlen auf, sondern auch auf der Rückseite der Kathode dringen durch die Kanäle hindurch leuchtende Strahlen, die offenbar aus jenen rückwärts-geschleuderten positiven Ionen bestehen. Das Studium der Kanalstrahlen hat noch lange nicht zu abschliessenden Resultaten geführt, es ist aber höchst wahrscheinlich, dass diese positiven Ionen vom Atomgewicht der in der Röhre befindlichen gasförmigen Elemente sind und mit Geschwindigkeit von 300—1500 km pro Sekunde hinter die Kathode ausgestrahlt werden²³).

B. Die β - und γ -Strahlen.

Zu allen drei Strahlengattungen, den Kathodenstrahlen, den Röntgenstrahlen und den Kanalstrahlen tritt ein gewisses Analogon in den Erscheinungen der Radioaktivität auf.

Am deutlichsten ist diese Strahlung, die, im Gegensatz zu den Aetherwellen, als *Elektronenstrahlung* bezeichnet werden kann, bei dem Radium beobachtbar. Seine Strahlen lassen sich bisher in drei Gruppen einteilen, die nach *Rutherford* α -, β - und γ -Strahlen genannt werden.

Die β -Strahlen bilden die bekannteste Gruppe, denn, obgleich sie keineswegs den Hauptteil der Elektronenstrahlung

ausmachen, sind sie doch in ihren Wirkungen am leichtesten wahrnehmbar. Sie sind die typischen Strahlungen negativer Elektronen, in jeder Beziehung mit den Kathodenstrahlen vergleichbar. Alle dort gefundenen Eigenschaften wiederholen sich: Erregung von Fluoreszenz und von Nachfarben, geradlinige Ausbreitung und Schattenbildung, Ionisierung der Gase, Mitführen negativer Ladungen, Ablenkungen im Magnetfelde und im elektrostatischen Felde; neu kommen hinzu die eigenartigen physiologischen Wirkungen, die sich hauptsächlich in Zerstörung aller durchstrahlten Gewebe äussern. Die β -Strahlen haben ein merklich grösseres Durchdringungsvermögen, als die gewöhnlichen Kathodenstrahlen: Aluminiumbleche und dünne Schichten leichter (und doch undurchsichtiger) Substanzen bilden kaum ein Hindernis für die β -Strahlen; auch dickere Platten werden noch durchsetzt, allerdings unter starker Absorption. Im allgemeinen wird angenommen, dass eine Bleiplatte von 1 cm Dicke alle β -Strahlen mit Sicherheit aufhält.

Dieses kräftige Durchdringungsvermögen steht in direkter Beziehung mit der enormen Geschwindigkeit, womit die negativen Elektronen von dem Radium ausgestrahlt werden. *Kaufmann* hat Geschwindigkeiten beobachtet, die 236,000—283,000 km pro Sekunde erreichen. Dabei sendet eine radioaktive Substanz, z. B. eine Radiumzelle, nicht ein homogenes β -Strahlenbündel aus, sondern wie in dem weissen Sonnenlichte die ganze Serie der Spektralfarben enthalten ist, so ist in jenen β -Strahlen ein ganzer Komplex ausgestrahlter, negativer Elektronen vorhanden, die mit verschiedenen Geschwindigkeiten dahineilen, die einen langsamer, die andern rascher. — Aber je grösser ihre Geschwindigkeit, um so kräftiger ihr Durchdringungsvermögen, um so weniger können die trägen, materiellen Moleküle der Bewegung der Elektronen ein Hindernis entgegenstellen. Es ist deshalb auch erklärlich, dass der Absorptionscoefficient irgend eines Materials (z. B. einer Aluminiumplatte) mit der Dicke desselben abzunehmen scheint; denn gerade in den ersten Schichten der absorbierenden Platte tritt eine grosse Schwächung der langsam beweglichen Strahlung ein, während mit zunehmender Dicke der Schicht die übrig bleibenden, stark durchdringungsfähigen Strahlen nur in geringem Masse absorbiert werden. Wie man aber durch ein Prisma das weisse Sonnenlicht

in das Farbenband seines Spektrums zerlegen kann, so lässt sich auch das komplexe β -Strahlenbündel in seine einzelnen, homogenen β -Strahlen auseinanderlegen, freilich nicht vermittelt eines brechenden Körpers, aber durch Einwirkung eines magnetischen Feldes; durch dessen Kraftlinien werden die β -Strahlen in Kreislinien abgebogen, dabei ist die Krümmung der Geschwindigkeit der Elektronen umgekehrt proportional: Die langsamen Strahlen werden kräftig, die raschen Strahlen schwächer abgelenkt, sie breiten sich deshalb nebeneinander aus; man erhält ein eigentliches, magnetisches Spektrum der β -Strahlen von verschiedenen Geschwindigkeiten.

Die γ -Strahlen sind wesentlich verschieden von den β -Strahlen (nicht etwa nur β -Strahlen von sehr grosser Geschwindigkeit). Sie treten nur in sehr geringer Quantität auf, aber ihre Wirkung ist doch beobachtbar wegen des enormen Durchdringungsvermögens, das ihnen zukommt. Auf mehrere Meter Distanz kann eine Radiumzelle noch entladend auf ein Elektroskop wirken; durch massive Bleiplatten, durch 20 cm dicke Eisenplatten soll ihr Vorhandensein noch spürbar gewesen sein. Die γ -Strahlen sind in jeder Beziehung den Röntgen-Strahlen analog; wie die letzteren, so zeigen sie keinerlei Beeinflussung durch noch so intensive magnetische Felder, was darauf hinweist, dass es sich hier um keine eigentliche Elektronenaussendung, sondern um eine sie begleitende Aetherschwingung handelt, deren Wellenimpulse von ausserordentlicher Kürze sind.

C. Die α -Strahlen.

Dass die α -Strahlen aus positiven Elektronen bestehen und mit den Kanalstrahlen identisch oder doch nahe verwandt seien, das lässt sich aus dem bisherigen leicht vermuten. Wirklich stimmt diese Vermutung in einigen Hauptpunkten sehr gut; aber die Verhältnisse sind doch etwas kompliziert, und, so wie die Natur der Kanalstrahlen schwierig zu erkennen war, so ist auch das Wesen der α -Strahlen noch lange nicht klargelegt.

Zunächst ist wichtig festzustellen, dass die α -Strahlung weitaus den Hauptteil der von den radioaktiven Körpern ausgehenden Strahlen darstellt. Aus *Rutherford's* Berechnungen (die später ausgeführt werden) ergibt sich, dass über 98% der

ausgestrahlten Energie eines Radiumpräparates aus α -Strahlen besteht. Es mag auffallend erscheinen, dass dessenungeachtet die α -Strahlen nicht leicht nachweisbar sind, ja, dass bei den gewöhnlichen Radiumzellen (bestehend aus einigen Krystallen Radiumbromid, in eine Metallkapsel eingebettet und durch ein Glimmerblättchen verschlossen) die Wirkung der α -Strahlen überhaupt nahezu Null ist. Der Grund dieser Erscheinung ist einfach: Im Gegensatze zu den γ - und auch schon zu den β -Strahlen werden die α -Strahlen äusserst kräftig von den benachbarten Körpern absorbiert.

Schon die umgebende Luft verschluckt sie sehr stark: ein frei liegendes Radiumpräparat zeigt die Wirkung seiner α -Strahlen nur auf 5—7 cm Distanz; innerhalb dieser Luftzone werden sie völlig absorbiert; Glimmerblättchen, Aluminiumblättchen von $\frac{1}{50}$ mm Dicke, Glasplatten von einigen mm Dicke reichen aus zur totalen Vernichtung der α -Strahlen. Zwar besitzen die α -Strahlen immer noch das die Elektronenstrahlung charakterisierende, allgemeine Durchdringungsvermögen; ist ein Körper hinreichend dünn, so kann er durchstrahlt werden (im Gegensatz zu den Licht- und Wärmestrahlen, die eine auswählende Absorption erleiden); ist ein Körper aber in dicker Schicht, und wäre es auch leichtes Wasserstoffgas, so gelangen die α -Strahlen nicht durch sie hindurch. Ja, die strahlende Substanz selber absorbiert sie so stark, dass stets nur die Wirkung einer dünnen Oberflächenschicht nach aussen merkbar wird. Vermeidet man jedoch solche absorbierende Schichten und bringt z. B. das unbedeckte Radiumsalz in möglichste Nähe des zu beeinflussenden Körpers, so kommt die α -Strahlung ausserordentlich kräftig zur Geltung: Prächtige Fluoreszenzerregung (besonders auf das hexagonale Schwefelzink, sog. Sidot-Blende, schön zu beobachten im sog. Spinthariskop von Crookes), gute photographische Wirkung, starke Ionisierung mit rapider Entladung des Elektroskopes.

Die Frage, was diese α -Strahlen, die den Hauptteil der radioaktiven Erscheinungen ausmachen, eigentlich seien, ist natürlich von fundamentaler Bedeutung. Leider scheint die Antwort darauf mit der Zeit nicht gerade leichter geworden zu sein.

Strutt war der erste, der a. 1901 die Vermutung aussprach, dass es sich hier lediglich um positive Elektronen-

strahlung handle. Im Jahre 1902 gelang es *Rutherford* zu zeigen, dass die α -Strahlen in einem sehr intensiven, magnetischen Felde eine ganz geringe Ablenkung erfahren und zwar in dem Sinne, in welchem positiv geladene Korpuskeln bewegt werden müssen. *Becquerel* konnte a. 1903 ebenfalls diese magnetische Ablenkung konstatieren, messend verfolgen und sie mit den Einwirkungen eines elektrostatischen Feldes vergleichen. Er fand: $e/m = 6 \cdot 10^3 \frac{\text{el. magn. E.}}{\text{gr}}$, $v = 2,5 \cdot 10^9 \frac{\text{cm}}{\text{sec}}$.

Analog fand *Descoudres*²⁴⁾, durch Messungen im Vacuum: $e/m = 6,4 \cdot 10^3$, $v = 1,65 \cdot 10^9 \frac{\text{cm}}{\text{sec}}$. *Rutherford*²⁵⁾ ermittelte a.

1905 aus seinen neuen Messungen an einem induziert aktiven Kupferdraht, aus magnetischen Beobachtungen kombiniert mit kalorischen Schätzungen: $e/m = 6,5 \cdot 10^3$, $v = 2,6 \cdot 10^9 \frac{\text{cm}}{\text{sec}}$. Etwas kleinere Zahlen findet in neuerer Zeit *Mackenzie*²⁶⁾ aus elektrostatischen und magnetischen Ablenkungen.

Demnach ist die Geschwindigkeit der α -Strahlen bedeutend geringer, als diejenige der β -Strahlen, immerhin 13,000—26,000 km pro Sekunde; dagegen ist ihre Masse wesentlich grösser: für $e = 1,07 \cdot 10^{-20}$ elektromagnetische Einheiten wird $m = 1,8 \cdot 10^{-24}$ gr, also grösser als die Masse des Wasserstoffatoms. — Abgesehen davon, dass die erwähnten Messungen ausserordentlich delikate auszuführen sind, so dass die vorliegenden Zahlen nur mit grösster Vorsicht aufzunehmen sind, hat sich bald eine andere Schwierigkeit gezeigt.

Wenn die α -Strahlen wirklich ausgeschleuderte, positive Elektronen sind, so müssen dieselben in passend isolierten Metallgehäusen aufgefangen werden können und dabei denselben eine positive Ladung zuführen. Der Nachweis dieser Ladung ist aber nicht leicht. Die früheren Versuche ergaben zunächst überhaupt keine Ladung, erst a. 1905 gelang es *Rutherford*²⁷⁾ unter Umständen eine solche aufzufinden. Er verwendete ein Radiumpräparat, das nur α -Teilchen aussenden soll (durch Entfernung der Emanation wird nämlich die Bedingung zur Bildung von β -Strahlen zeitweilig vernichtet); trotz aller Vorsichtsmassregeln zeigte sich keine positive Ladung der gegenüberliegenden, bestrahlten Metallplatte; als aber die-

selbe Versuchsanordnung unter Einwirkung eines kräftig wirkenden Magnetfeldes wiederholt wurde, da trat die gewünschte, positive Ladung mit Sicherheit auf, es schien somit ausser Frage, dass die α -Strahlen wirklich positive Elektronen seien. Auch Versuche von *Thomson*²⁸⁾ aus neuerer Zeit gelangen zu gleichen Resultaten. Die neuesten Publikationen von *O. Wigger*²⁹⁾ und von *P. Ewers*³⁰⁾, die mit Polonium, Radiotellur und Radioblei ausgeführt wurden, bestätigen die Beobachtung, dass derartige Präparate, die als bloss α -strahlend angesehen werden, wirklich eine positive Elektronenstrahlung liefern. — Doch gelingt der Nachweis jener Ladung immer nur bei Anwendung eines kräftigen, magnetischen Feldes.

Worin kann aber die günstige Wirkung eines solchen Magnetfeldes bestehen? Es muss offenbar eine störende Ursache vorhanden sein, die unter gewöhnlichen Umständen die Ladung der α -Strahlen neutralisiert, und die durch die magnetischen Kräfte weggeschafft wird. Diese Ursache kann wohl nur in einer Strahlung negativer Elektronen liegen, die beständig die α -Strahlen begleitet. Eine solche würde in der Tat die positive Ladung der α -Strahlen stets verdecken, anderseits könnte sie, wie jede Art β -Strahlen, durch den Magneten abgelenkt werden. Natürlich wird dadurch die bisherige Anschauung betreffend α -Strahlen etwas abgeändert. Alle die Substanzen, wie Polonium, Radiotellur, ent-emanirtes Radium etc., die man als lediglich α -strahlend ansah, würden dann auch langsame β -Strahlen aussenden. *J. J. Thomson*³¹⁾ war der erste, der a. 1904 das Vorhandensein derartiger, langsamer, negativer Elektronenstrahlung am Polonium nachwies. Er beobachtete nämlich, dass die Strahlung eines solchen Präparates eine benachbarte, elektrisch geladene Platte viel rascher entlud, wenn sie positiv, als wenn sie negativ geladen sei, und schloss daraus, dass aus dem Polonium ein Ueberschuss negativer Elektronen über den positiven α -Strahlen bestehe. Diese Tatsache erklärt jedenfalls auch die Resultate *Rutherfords*, übrigens wurde sie durch die Versuche von *Wigger* und von *Ewers* durchaus bestätigt. *Ewers* gelang es sogar, im Vacuum unter Einwirkung magnetischer und elektrostatischer Kräfte die Konstanten jener negativen Elektronen zu bestimmen; er findet für e/m nahezu den bekannten Wert für negative Elektronen, für die Geschwindig-

keit nur 3250 km pro Sekunde. — Diese Zahl ist in Uebereinstimmung mit der Angabe von *Thomson*, wonach es sich hier nicht um die gewohnte β -Strahlung handeln kann (deren Geschwindigkeit 200,000 km pro Sekunde übertrifft), sondern um eine äusserst langsame, deshalb auch ausserordentlich stark absorbierbare Strahlung negativer Elektronen, deren Wirkung bisher von den ebenfalls stark absorbierbaren α -Strahlen nicht unterschieden werden konnte.

Es würde dies gleichsam eine 4. *Kategorie von Strahlungen* darstellen, für welche noch keine Bezeichnung besteht und die hinfort «*langsame β -Strahlen*» genannt werden sollen. Ueberall, wo α -Strahlen erzeugt werden, sind dann auch jene langsamen β -Strahlen vorhanden, wobei die letztern wegen ihrer geringen Geschwindigkeit und Masse nicht mehr imstande sind, die durchstrahlten Gase zu ionisieren, und deshalb keine radioaktive Wirkung auf die Messapparate ausüben; im magnetischen Feld werden jene langsamen Strahlen so kräftig abgelenkt, dass die reine Wirkung der α -Strahlen bemerkbar wird.

Freilich fragt sich es dann, ob man nicht noch einen Schritt weiter tun solle und nach *Soddy's*³²⁾ Angaben annehmen dürfe, dass die aus den radioaktiven Substanzen ausgesandten α -Teilchen ursprünglich überhaupt keine elektrische Ladung besitzen, sondern neutrale Korpuskeln, kleinere Atome (wie später ausgeführt wird, wahrscheinlich Helium-Atome) seien. Diese α -Teilchen würden gleich bei ihrem Austritt auf die umgebenden Gasmoleküle treffen und dieselben in bekannter Weise ionisieren. Dabei werden sie aber bei dem Zusammenstoss selber auch ionisiert. Jedes α -Teilchen schleudert dabei ein negatives Elektron ab und eilt nun selber als positiv geladenes Teilchen weiter. So würden aus den ursprünglich neutralen Korpuskeln von Anfang an die positiven α -Strahlen und die negativen, langsamen β -Strahlen entstehen müssen. — Diese Anschauungen sind natürlich noch zu neu, als dass ein abschliessendes Urteil darüber möglich wäre.

Eine andere Eigenschaft der α -Strahlung ist durch die Beobachtungen von *Bragg* und *Kleemann*³³⁾ a. 1904 hervorgehoben worden. Ihre Messungen suchten festzustellen, in welcher Weise die Absorption der α -Strahlen in der Luft

von der Entfernung der radioaktiven Quelle abhängen, und wie weit die α -Strahlen überhaupt noch ionisierend wirksam sind. Es ergab sich zunächst, dass an Radiumpräparaten wenigstens *viererlei verschiedene α -Strahlen* nachweisbar seien, die durch ihre Geschwindigkeit und demnach durch ihre Durchdringungsfähigkeit sich unterscheiden lassen. Die letztere lässt sich relativ einfach bestimmen, indem bei zunehmender Entfernung von dem Radium die betreffende α -Strahlung zunächst fast unveränderte Intensität aufweist und dann plötzlich aufhört. Die Entfernungen, bei denen diese Strahlenwirkungen in der Luft aufhören, sind: 3,50 resp. 4,23, resp. 4,83, resp. 7,06 cm. Die Versuche von *Rutherford*³⁴⁾ und von *Mc. Clung*³⁵⁾, sowie zum Teil auch diejenigen *Wiggers*²⁹⁾, bestätigen diese Beobachtungen durchaus, und zwar nicht nur für die komplizierte Strahlung der Radiumpräparate, sondern namentlich für die einfachere, homogene α -Strahlung der induziert aktiven Körper und des Radiotellurs. Auch bei Durchdringen von Aluminiumblättern macht sich dieses plötzliche Verschwinden der α -Strahlen geltend. Legt man in ihren Weg sukzessive ein Aluminiumblättchen nach dem andern (von jeweiligen 0,00031 cm Dicke), so tritt eine beständige Schwächung der Strahlen auf. Nach *Rutherford* treten durch zwölf solche Blätter noch 41% der Strahlen hindurch, legt man ein dreizehntes Blättlein darauf, so ist die Strahlung auf einmal total absorbiert. Es muss demnach eine gewisse Grenzgeschwindigkeit geben, oberhalb derselben die Strahlen kräftig ionisieren, unterhalb derselben sie aber nicht mehr imstande sind, ein Gasmolekül in seine Ionen zu zerspalten. *Rutherford* findet für diese Grenzgeschwindigkeit 15,000 km pro Sekunde, jedenfalls ist sie noch wesentlich kleiner. Das Bestehen derselben würde auch erklären, warum die «langsamen β -Strahlen» am Elektroskop nicht nachweisbar sind.

Schon *Becquerel* hatte früher gefunden, dass das Absorptionsvermögen irgend einer Substanz für α -Strahlen mit ihrer Dicke zunimmt (im Gegensatz zu den β - und γ -Strahlen, p. 20). Die Diskussion über die damit zusammenhängenden Fragen ist vollständig³⁶⁾ zu Gunsten der obigen Ausführungen ausgefallen, wonach die α -Strahlen eines radioaktiven Präparates mehr oder weniger inhomogen sind. Mit verschiedenen

Geschwindigkeiten treten sie aus demselben heraus, ionisieren die Luft, verlieren durch die Zusammenstöße immer mehr von ihrer Geschwindigkeit, werden also scheinbar immer stärker absorbiert, und auf einmal sind sie nicht mehr imstande, die Luft zu ionisieren. — Dabei wird seltsamerweise beobachtet, dass das Ionisierungsvermögen anfänglich etwas geringer ist und zunächst mit abnehmender Geschwindigkeit zunimmt, bevor es definitiv verschwindet. Diese Beobachtung ist auch bei den β -Strahlen gemacht worden und zeigt nur, dass die Ionisierung bei einer gewissen, mittleren Geschwindigkeit der Elektronen einen Maximalwert besitzt.

Endlich muss noch einer interessanten *Lichterscheinung* gedacht werden, die wohl mit den α -Strahlen im Zusammenhang stehen könnte, die aber noch der Abklärung harret.

Die Radiumsalze senden unausgesetzt ein eigenes Fluoreszenzlicht aus. Bei der spektralen Untersuchung desselben fanden *Sir W. und Lady Huggins*³⁷⁾, dass jenes Fluoreszenzlicht stets das Bandenspektrum des Stickstoffes aufweise, neben andern für jenes Licht charakteristischen Streifen. Diese Beobachtungen sind durch *Himstedt* und *Meyer*³⁸⁾, sowie durch *Walter* und *Pohl*³⁹⁾ bestätigt worden. Auffallend ist dabei, dass stets nur das Spektrum des Stickstoffes auftritt, auch sogar dann, wenn das Radiumpräparat in ein anderes Gas, z. B. in Wasserstoff, eingebettet wird. *Huggins* verfolgte diese Erscheinungen genau, indem er das Fluoreszenzlicht von Radiumpräparaten in Wasserstoff während nahezu einem Jahre untersuchte. Dabei zeigte sich einige Zeit noch das deutliche Bandenspektrum des Stickstoffes, aber doch allmählich abklingend; gleichzeitig färbte sich das gelbliche Radiumsalz dunkel rotbraun. Nach 8—10 Monaten begann das Präparat, das mit der Zeit all' sein Fluoreszenzlicht verloren hatte, wieder hell zu leuchten, diesmal eine deutliche Bande im grün ($\lambda = 516,5 \mu\mu$) liefernd. Sobald das Präparat aus dem Wasserstoff entfernt wurde, verschwand dieses Licht vollständig. Dabei war die Radioaktivität der β - und γ -Strahlen stets unverändert, auch war nie eine Spur der Linien des Wasserstoffspektrums sichtbar.

Damit zusammenhängend ist die Erscheinung, dass nicht nur das Radiumpräparat selber Fluoreszenzlicht aussendet,

sondern dass auch die benachbarten Luftschichten einen schwachen Lichtschimmer zeigen, der sogar imstande ist, photographische Wirkungen auszuüben. *Himstedt* und *Meyer* haben direkt nachweisen können, dass das Licht dieses Schimmers auch das Stickstoffspektrum liefert, und dass dieser Schimmer aufhört, wenn das Präparat in Wasserstoff oder in Kohlensäure gelegt wird. Offenbar liegt hier ein noch unaufgeklärter Zusammenhang zwischen den radioaktiven Strahlungen und den Eigenschwingungen der Stickstoffmoleküle vor. Dass dabei wohl in erster Linie die α -Strahlen lichterregend wirken, folgt unter anderm daraus, dass dieselbe Erscheinung auch bei Radiotellur, das nur α -Strahlen abgibt, auftritt. Nach einer Hypothese von *J. Stark*⁴⁰⁾ ist das Bandenspektrum eine Folge der Ionisation der Stickstoffmoleküle durch den Stoss mit den α -Teilchen. Das Auftreten des grünen Fluoreszenzlichtes im Wasserstoff weist daraufhin, dass hier noch andere, unbekannte Prozesse im Spiele sind.

III. Die radioaktiven Substanzen.

In der historischen Einleitung wurde darauf hingewiesen, wie die Eigenschaften der Radioaktivität zunächst an zwei schon bekannten Elementen, dem *Uran* und dem *Thor* aufgefunden wurden, und wie die Entdeckung neuer Elemente, wie des *Radiums*, sich daran anknüpfte. Die Aufsuchung anderer radioaktiver Elemente wurde natürlich eifrigst betrieben; wirklich wurde eine ganze Zahl neuer Substanzen angekündigt, deren chemischer Charakter freilich oft fraglich blieb, und die hier in passender Gruppierung besprochen werden sollen.

Was zunächst die *Mineralien* anbetrifft, die als Ausgangsmaterial aller radioaktiven Elemente dienen, so ist die auffallende Tatsache zu konstatieren, dass fast ausschliesslich uranhaltige Minerale hier in Betracht kommen. Sogar die radioaktiven Thoriumpräparate sind wohl nur aus denjenigen Thormineralien erhältlich, die gleichzeitig uranhaltig sind; wenigstens

ist es *Hofmann* und *Zerban*⁴¹⁾ a. 1903 gelungen, aus völlig uranfreiem Orthit Thorerde in reinsten Form abzuscheiden, deren Radioaktivität durchaus nicht nachweisbar war. Eine recht vollständige Zusammenstellung der radioaktiven Minerale gibt *G. v. d. Borne*⁴²⁾. Die dort angegebenen, ausnahmsweise weder Uran noch Thor haltenden Gesteine sind: Reissacherit, Barytin, Orthit, Gadolinit, Pyromorphit, Zinnober und Zinnstein. Dieselben sind jedoch entweder in der Nähe radiumhaltiger Quellen, sodass sich auf ihnen Radium sekundär abgelagert haben kann, oder ihre Radioaktivität beruht überhaupt nur auf Messungen an vereinzelt Exemplaren, die nicht beweiskräftig sind.

A. Das Uran.

Ein längst bekanntes Element, dessen Atomgewicht 238,5 (O = 16) das bisher höchste ist. Seine radioaktiven Verhältnisse sind die denkbar einfachsten.

Die Strahlung des Urans und seiner sämtlichen Verbindungen sind als schwach zu bezeichnen und äussern sich hauptsächlich in Form der β -Strahlen, die von *Becquerel* so ausserordentlich gründlich studiert worden sind. γ -Strahlen konnten von *Rutherford* nur in ganz geringer Quantität aufgefunden werden. Auch das Vorhandensein von α -Strahlen wurde erst a. 1899 von letzterem auf elektroskopischem Wege nachgewiesen, während sie der photographischen Methode *Becquerels* entgangen waren. Die α -Strahlen des Urans sind eben so stark absorbierbar, dass eine dünne Papierschicht genügt, um deren Wirkung zu verdecken.

Das Uran entwickelt keinerlei merkbare Emanation, so dass all' die komplizierten Erscheinungen der induzierten Aktivität wegfallen. Interessant und für die späteren Betrachtungen wichtig sind folgende Verhältnisse.

W. Crookes glaubte in dem Uran eine unbekannt Substanz, welche die Ursache seiner Radioaktivität sei, finden zu können. Seine Versuche⁴³⁾ schienen mit Erfolg gekrönt; denn es gelang ihm, aus chemisch reinen Uransalzlösungen ein kräftig aktives Präparat von einem völlig inaktiven Rest zu trennen. Dieses aktive Präparat nannte er *Uranium X*. Durch Fällung mit

Ammoniumkarbonat und Auflösen des Niederschlages im Ueberschuss bleiben Spuren eines Niederschlages übrig, der das U. X. enthält, während die Lösung mit der Hauptmasse des Urans inaktiv bleibt. Auch durch Auflösen in Aether und Wasser lässt sich im Aether das U. X. abscheiden, wogegen die wässerige Lösung inaktiv wird. *Becquerel* nahm diese Versuche wieder auf und fand, dass u. a. durch Ausfällen von Bariumsulfat aus einer Lösung von Barium- und Uransalzen das sonst inaktive Barium kräftig aktiv wurde, also U. X. mitgerissen, während die Uranlösung ihre Aktivität verloren hatte. Dabei kam ein anfänglich höchst überraschendes Resultat zu Tage.

Längere Zeit hindurch wurde die Wirkung des stark aktiven U. X. mit derjenigen der inaktiv gewordenen Uranlösung verglichen: Die erstere nahm beständig ab, die letztere hingegen wieder zu! Nach 22 Tagen hatte das U. X. die Hälfte seiner Aktivität verloren, und das Uran war zu gleicher Aktivität heraufgestiegen. Diese Abnahme resp. Zunahme fand nach einem einfachen, mathematischen Gesetz (Exponentialfunktion) statt. Nach 3—4 Monaten war das U. X. definitiv inaktiv geworden, dagegen hatte das Uransalz seine volle, ursprüngliche Aktivität wieder erlangt, als ob nie eine Störung in derselben eingetreten wäre. — Diese Beobachtung, die seither zahlreiche Wiederholung und Bestätigung erfahren hat, ist insofern zu erweitern, dass jene Aenderungen sich nur auf die gewohnten Uranstrahlen, d. h. auf seine β -Strahlung, beziehen. Die Untersuchungen *Rutherfords* bewiesen, dass die α -Strahlung, die aber schwer wahrzunehmen ist, sich wesentlich anders verhält. Das Uransalz verliert seine α -Strahlung nie, auch nicht bei Abscheidung von U. X., und das frische U. X. liefert wohl deutliche β -Strahlung, aber nie α -Strahlen.

Dieses Entstehen und Verschwinden des U. X. war wohl der erste experimentelle Nachweis des inneren Umwandlungsprozesses, den die radioaktiven Körper erfahren. Der Vorgang, der sich dabei abspielt, lässt sich etwa folgendermassen denken:

Das Uran ist und bleibt das eigentliche, primäre, radioaktive Element, das dauernd und spontan einem Zersetzungsprozess unterworfen ist. Im Laufe der Jahrtausende wandeln sich seine Atome um, und diese Umwandlung geschieht in

zweifacher Weise: 1. Stetsfort spalten sich aus dem Uranatom unbekannte, uranähnliche Atome ab, die das sog. U. X. bilden. 2. Stetsfort schleudert das Uranatom kleine Korpuskeln aus, die in Form von α -Strahlen in die Umgebung dringen. Dieser Zerfall geht unter allen Umständen vor sich, deshalb liefert das Uran immer α -Strahlen und ist nach einiger Zeit immer wieder mit U. X. gesättigt. Dieses U. X. selber zerfällt jedoch weiter in neue, unbekannte Atome, und dabei schleudert es auch etwas ab, aber diesmal negative Elektronen, also β -Strahlen. Die β -Strahlung des Urans rührt also erst sekundär von dem in ihm angehäuften U. X. her, und so lange das Uransalz ungestört gelassen wird, geht dieser Prozess ruhig weiter: Uran zerfällt in U. X. unter Aussendung von α -Strahlen, U. X. zerfällt in ein inaktives Endprodukt unter Ausstrahlung von β -Teilchen. — Wird aber durch chemische Reaktionen das U. X. von dem Uran abgetrennt, so bleibt zwar das übrig gebliebene Salz primär aktiv, d. h. es sendet α -Strahlen aus und bildet langsam neues U. X. Aber die β -Strahlen sind nun verschwunden und nur allmählich beginnt das wieder entstehende U. X. seine β -Strahlung zu offenbaren, nach 22 Tagen ist die Hälfte des verlorenen U. X. ersetzt, nach Monaten ist der ursprüngliche Gleichgewichtszustand wieder hergestellt. Das frisch abgeschiedene U. X. hingegen vollführt mit Sicherheit seinen Zerfallprozess; unter anfänglich kräftiger β -Strahlung wandelt es sich stetig um, da es aber von seiner Muttersubstanz, dem Uran, getrennt ist, so kann es sich nicht neu bilden, es nimmt beständig ab, es klingt ab; nach 22 Tagen hat sich die Hälfte U. X. zerstört, und nach einigen Monaten ist jede Spur desselben verschwunden, die β -Strahlung ist definitiv erloschen. — So ist das Uran der eigentlich radioaktive Körper, der zeitweise des U. X. und seiner β -Strahlung beraubt werden kann, sich aber immer wieder regeneriert, während das U. X. ein sekundär-radioaktiver Körper ist, der zwar die Hauptstrahlen erzeugt, aber, sich selbst überlassen, einem sicheren Untergange geweiht ist.

Zum Schlusse sei noch bemerkt, dass die β -Strahlung des Urans als Einheitsmass verwendet wird. Die Strahlung, die von 1 gr reinen Uran ausgehen wird, ist die *Einheit der radioaktiven Wirkung* (die sog. französische Aktivitätseinheit).

B. Das Radium und seine Produkte.

1. Das Radium.

Das Radium ist zweifellos ein wirkliches Element, von der Gruppe der alkalischen Erden, zweiwertig, in chemischer Beziehung dem Barium ausserordentlich ähnlich. Sein Atomgewicht wurde von *S. Curie* zu 225 ($O = 16$) bestimmt; aus spektroskopischen Beobachtungen schliessen *Runge* und *Precht* auf ein Atomgewicht 258, doch mag die direkte, chemische Bestimmung wohl grössere Sicherheit bieten.

Das Spektrum des Radiums ist vielfach ermittelt worden. Schon *Denarçay* hat in den ersten, noch sehr unreinen *Curie*-schen Präparaten die stärkste, violette Linie ($\lambda = 381,5 \mu\mu$) im Funkenspektrum nachweisen können, später haben *Runge* und *Precht*⁴⁴⁾ das Funken- und Flammenspektrum photographisch aufgenommen. *Giesel* beobachtete, dass schon minimale Mengen eines reinen Radiumsalzes der Bunsenflamme eine charakteristische Purpurfärbung erteilen. Im Spektroskop zeigt eine solche Flamme zwei helle Banden im Orangerot, eine besonders charakteristische helle Linie im Blaugrün ($\lambda = 482,6 \mu\mu$) und zwei schwache Linien im Violett.

Die Radioaktivität des Radiums übertrifft weitaus diejenige anderer Substanzen. Nach *Curies* Angaben weisen chemisch reine Radiumsalze eine Aktivität von 1,800,000 französische Einheiten auf, d. h. 1 gr Radium soll 1,800,000 mal aktiver sein als 1 gr Uran. Natürlich ist diese Zahl nur in ganz roher Weise als richtig anzusehen, umsomehr, als bei dem Uran eigentlich nur die β -Strahlen wirksam sind, während bei dem Radium die α -Strahlen einen wesentlichen Beitrag zu der Gesamtradioaktivität liefern.

Eine künstliche Abscheidung eines sekundären Produktes, ähnlich dem U. X., hat sich bei dem Radium nicht gezeigt. Dagegen strömt es (in gelöstem Zustande) beständig von selbst eine sekundäre, radioaktive Substanz aus, die schon mehrfach erwähnte *Emanation*. Diese Emanation, deren gasförmige, materielle Natur wohl allgemein anerkannt wird, setzt den Umwandlungsprozess unter beständiger Elektronenstrahlung fort, ihre Restbestandteile schlagen sich als *induzierte Aktivität* auf den benach-

barten Körpern nieder und verwandeln sich in eine sukzessive Reihe neuer, radioaktiver Substanzen. Von *Rutherford* sind bisher sechs solcher Umwandlungsstufen nachgewiesen worden, die er als *Radium A*, *Radium B*, *Radium C*, *Radium D*, *Radium E* und *Radium F* bezeichnet. Der Vorgang dieser Umbildung verläuft etwa in folgender Weise:

Das Radiumatom selber ist der primäre Stoff, der dauernd und spontan die radioaktiven Erscheinungen einleitet. Seine Umbildung äussert sich, wie bei dem Uran, in zweifacher Weise: beständig zerfällt das Atom in ein neues Emanationsatom und sendet dabei α -Strahlen aus. Dies lässt sich dadurch beweisen, dass man durch kräftiges Erhitzen alle in einem Radiumpräparat angehäufte Emanation austreibt; es bleibt dann nur noch das primäre, *ent-emanierete Radium* übrig, dessen unzerstörbare Restaktivität in blosser α -Strahlung besteht, während sämtliche β - und γ -Strahlen verschwunden sind (ähnlich wie das Uran, welchem das U. X. entzogen wurde). Diese minimale α -Aktivität, die durch keine Mittel vernichtet werden kann, macht nur noch 25% der gesamten α -Strahlung des Radiums aus, die andern 75% sind durch das Ent-emanieren ausgetrieben worden (mit dieser α -Aktivität verbunden sind dann die noch übrig bleibenden «langsamen β -Strahlen» siehe p. 25). Beobachtet man die frei gewordene Emanation, so wiederholt sich hier das Spiel von neuem. Auch sie bildet sich um in zweifacher Weise: Zerfall in ein Atom induzierter Aktivität, des sog. Radiums A, und Aussendung von α -Teilchen. In der Tat lässt sich zeigen, dass frisch aufgefangene Emanation anfangs nur eine schwache α -Strahlung erzeugt, die etwa 17% der gesamten α -Strahlen des Radiums bildet, β - und γ -Strahlen sind auch hier nicht nachweisbar. Jedoch, sie lassen nicht lange auf sich warten. Ist Emanation in einem Gefäss aufgefangen worden, so beginnt an den Gefässwänden die induzierte Aktivität merkbar zu werden und zwar zunächst in den drei rasch aufeinanderfolgenden Stufen des Radiums A, des Radiums B, des Radiums C. Bei der Umbildung des Radiums A werden etwa 29% der gesamten α -Strahlung erzeugt, bei der Umwandlung des Radiums B in Radium C gibt es fast keine Strahlen, aber bei dem Zerfall des Radiums C in Radium D kommt nun die volle Elektronenstrahlung zur

Geltung; die α -Strahlung bildet die 29 fehlenden Prozente der Gesamt- α -Strahlen, kräftig treten die β - und γ -Strahlen auf. Mit der Bildung des Radiums D erfolgt eine grosse Pause im Entwicklungsvorgang, so dass derselbe momentan ein Ende erreicht und das Radium D als inaktives Endprodukt erscheint.

Alle diese Substanzen: Emanation, Radium A, Radium B, Radium C sind sekundär aktiv, d. h. sie weisen eine mehr oder weniger kräftige Elektronenstrahlung auf, bei gleichzeitiger Umwandlung ihrer Atome in die nächstfolgende Atomart — aber dabei gehen sie eben selber zu Grunde und wenn sie sich selbst überlassen sind, so klingt ihre Aktivität gemäss einfachen, mathematischen Gesetzen ab. So verliert die Emanation, die in einem Gefäss aufgefangen wird, nach einer anfänglichen Störungsperiode von einigen Stunden, stetig ihre Aktivität, in je 4 Tagen sinkt sie auf die Hälfte, nach einigen Wochen ist sie spurlos verschwunden; so verliert ein induziert aktiviertes Metallstück (ebenfalls nach einer anfänglichen Störungsperiode) seine β -Aktivität, die von dem anheftenden Radium C herrührt, in kurzer Zeit: in 28 Minuten sinkt dieselbe auf die Hälfte, am folgenden Tage ist sie unmerklich schwach geworden. Diese Abklingung, die am einfachsten durch die Angaben der Zeit, innerhalb derer die Aktivität auf den halben Wert herabsinkt, bezeichnet wird (die sog. *Halbierungsconstante*, H. C.), ist für jede Umwandlungsstufe charakteristisch. Die folgende Tabelle gibt die von *Rutherford* aufgestellten Zahlen nebst den bei der betreffenden Umwandlung ausgeschleuderten Elektronen:

	H. C.	Strahlung
Radium	—	α -Strahlen
Emanation	4 Tage	α -Strahlen
Radium A	3 Minuten	α -Strahlen
Radium B	21 Minuten	keine Strahlen
Radium C	28 Minuten	α -, β -, γ -Strahlen

Natürlich gelten dieselben Zahlen auch für den umgekehrten Prozess. Wenn frische Emanation mit einem inaktiven Körper in Berührung kommt, so beginnt an demselben die Bildung der induzierten Aktivität gemäss den obigen Zahlwerten. Wenn ent-emanirtes Radium sich selbst überlassen bleibt,

so entsteht aus demselben frische Emanation, und nach ca. 4 Tagen erreicht der Gehalt an Emanation schon die Hälfte des Schlussbetrages. Gerade hier zeigt sich der Unterschied zwischen den Umwandlungsprodukten des Radiums, die mit der Zeit stets völlig verschwinden und dem primären Radium, das sich immer wieder regeneriert. Man kann ein Radiumsalz irgendwie ent-emanieren, sei es durch Erhitzen, sei es durch Auflösen und Auskrystallisieren — es beginnt sofort, wenn auch langsam, den Neubildungsprozess. Unter beständiger α -Strahlung bildet sich Emanation und häuft sich im Radiumpräparat an. Nach 4 Tagen ist die Hälfte des Emanationsgehaltes erreicht. Doch die Emanation bildet auf den Radiumkrystallen selber induzierte Aktivität, A, B, C, die nach einigen Stunden schon merklich ist — und so entsteht allmählich ein Gleichgewichtszustand, in welchem fortwährend gleich viel Emanation entsteht als in Radium A umgewandelt wird, gleich viel Radium A entsteht als Radium B gebildet wird usw., d. h. in welchem die Mengen Emanation, Radium A, Radium B und Radium C unverändert bleiben. Dann hat das Radiumpräparat seine *maximale, konstante Aktivität* erhalten, es liefert kräftige β - und γ -Strahlen, aber dieselben gehen nicht vom eigentlichen Radium selber aus, sondern von dem auf ihm gebildeten Radium C. Natürlich wird dieser Gleichgewichtsprozess erst nach einigen Wochen vollendet — aber er kommt immer wieder zustande, auch wenn das betreffende Radiumpräparat unzählige Male ent-emanieren wurde.

Die verschiedenen Radiumstufen lassen sich in ihren verschiedenen Eigenschaften immer wieder verfolgen und nachweisen. Von den diesbezüglichen Beobachtungen sollen nur die Messungen von *Rutherford* und *Barnes*⁴⁵⁾ erwähnt werden, welche sich auf die *Wärmeproduktion des Radiums* beziehen. Die Wärmemenge, welche bei konstanter Temperatur von 1 gr Radium pro Stunde abgegeben wird, beträgt nach *Runge* und *Precht* ca. 104 gr Calorien, nach neueren Zahlen⁴⁶⁾ mag dieselbe grösser sein und ca. 115 gr Cal. erreichen. Nach den Messungen der amerikanischen Forscher kommt aber diese Wärmeerzeugung hauptsächlich auf Rechnung der Emanation und der induzierten Aktivität; denn das ent-emanierete Radium liefert per Stunde nur noch eine Wärmemenge von 25—30 gr

Cal., d. h. 25 % der Gesamtwärme — gerade entsprechend seiner α -Strahlung, die auch 25 % der totalen α -Strahlung ausmacht. Die Emanation und die davon kaum trennbare, induzierte Aktivität des Radiums A liefern etwa 44 % der Wärme und die eigentliche induzierte Aktivität, Radium B und Radium C erzeugen noch 31 % der gesamten Wärmeproduktion des Radiums.

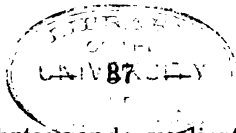
Die interessanten, aber etwas hypothetischen Zahlen, die sich aus diesen Messungen ergeben, werden später erörtert.

2. Polonium, Radiotellur, Radioblei.

Diese drei radioaktiven Elemente, deren Natur Gegenstand vielfacher Diskussionen war, gehören offenbar eng zusammen und sind eigentlich nur als Abkömmlinge des Radiums aufzufassen.

Das *Polonium* ist das erste, kräftig radioaktive Präparat, das von Frau *Curie* aus der Pechblende abgeschieden wurde, und zwar als stete Beimengung der daselbst enthaltenen Wismuthsalze. Eine Trennung des Poloniums von dem Wismuth ist jedoch nie gelungen, so war auch keine Atomgewichtsbestimmung möglich, und auch das Spektroskop hat keine charakteristischen Linien jenes hypothetischen Elementes zeigen wollen. Seine Radioaktivität unterscheidet sich wesentlich von derjenigen des Urans und des Radiums dadurch, dass das Polonium ausschliesslich α -Strahlen aussendet und keinerlei β - oder γ -Strahlen von sich gibt, ebensowenig als Emanation und induzierte Aktivität. Insofern sind Poloniumpräparate von Bedeutung, als sie zum Studium der reinen α -Strahlung besonders geeignet sind; freilich ist, nach den neueren Untersuchungen (p. 25), diese α -Strahlung stets von «langsamen β -Strahlen» begleitet.

Die Aktivität frisch bereiteter Poloniumpräparate ist nicht gering (*Curie* hat solche von 100,000 Aktivitätseinheiten erhalten), aber sie dauert nicht an. Hier liegt der springende Punkt, der es wahrscheinlich macht, dass das Polonium kein eigentliches, primär radioaktives Element sei, sondern wahrscheinlich nur eine Art induzierte Aktivität, ein *sekundär radioaktives Wismuthsalz*. Es ist ja wahrscheinlich, dass überhaupt jedes Element (auch Uran und Radium) seine Akti-



vität im Laufe der Jahrtausende verliert, und demnach würde sich das Polonium wohl nur quantitativ von andern radioaktiven Elementen unterscheiden. Aber die andern, oben erwähnten Punkte sprechen doch sehr entschieden dafür, dass es sich hier nicht um ein chemisches Element handeln könne.

Die ersten Poloniumpräparate von Frau *Curie* waren jedenfalls noch nicht sehr rein; es zeigte sich, dass dieselben verschieden schnell abklingen: das eine verlor in 11 Monaten seine halbe Aktivität, ein anderes nahm in 6 Monaten um 67% ab. Die neuesten Messungen von Frau *Curie*⁴⁷⁾ geben nun ziemlich sichere, einheitliche Zahlen. Das Polonium besitzt eine Halbierungskonstante von ca. 140 Tagen (diese Zahl soll bis auf 3% genau sein). Diese Angabe lässt die letzten Zweifel darüber verschwinden, dass das Polonium mit dem Radiotellur identisch sei.

Das *Radiotellur* wurde a. 1902 von *Marckwald* entdeckt. Scheidet man aus der Uranpechblende die Wismuthsalze in Lösung ab und taucht ein blankes Wismuthstäbchen in dieselbe hinein, so überzieht sich dasselbe mit einem feinen schwarzen Niederschlag, der eine ausserordentlich kräftige Strahlung zeigt — und zwar genau wie das Polonium eine reine α -Strahlung (allerdings vermischt mit «langsamen β -Strahlen»), ohne β - und γ -Strahlung und ohne Emanation. Dieselbe Substanz kann durch Ausfällen der obigen salzsauren Lösung mit Zinnchlorür als schwarzes Pulver erhalten werden; diese letztere Reaktion veranlasste den Entdecker, die Substanz als dem Tellur verwandt anzusehen.

*Marckwald*⁴⁸⁾ hat die Darstellung des Radiotellurs in grossem Masstabe betrieben. Aus etwa 15 Tonnen Joachimsthaler Pechblende blieben nach der Urangewinnung 5 Tonnen Rückstand. Dieselben hat er verarbeitet und zuletzt aus dieser enormen Menge 16 gr einer Lösung von Selen, Tellur und Radiotellur dargestellt; aus diesem schon sehr aktiven Rest ist endlich das Radiotellur in möglichst reinem Zustande ausgeschieden worden: es blieben noch 3 mgr Radiotellur übrig! Aber diese 3 mgr sind von ausserordentlicher Aktivität, so kräftig, dass mit Bruchteilen von Milligrammen intensive Wirkungen erzielt werden. So genügen z. B. $\frac{1}{100}$ mgr dieses konzentrierten Radiotellurs, um noch nach 2 Jahren ein so inten-

sives Leuchten eines Phosphoreszenzschirmes zu erzeugen, dass dasselbe auf 10—15 m Distanz deutlich sichtbar ist. — Aber so wenig wie bei dem Polonium lässt sich eine Atomgewichtsbestimmung ausführen, und ebensowenig zeigt das Spektroskop Linien eines neuen Elementes. Auch hier kann es sich deshalb wohl nur um eine induzierte Aktivität handeln, die sich speziell an Wismuth oder Tellur anzuheften pflegt. Die Abklingung des Radiotellurs wurde sorgfältig studiert⁴⁹⁾, es ergab sich für dieselbe eine Halbwertszeit von 139,6 Tagen, also derselbe Wert wie für Polonium.

Wenn aber Polonium und Radiotellur nur induzierte Aktivitäten sind, so muss sich eine primäre Substanz finden lassen, die jene erzeugt. Dieselbe ist jedenfalls das Radioblei.

Das *Radioblei* ist ebenfalls ein Abscheidungsprodukt der Uranpechblende. *Elster* und *Geitel* waren die ersten, welche a. 1899 beobachteten, dass die aus der Pechblende ausgefallenen Bleisalze eine merkliche Radioaktivität besitzen. *Hofmann* und *Strauss*⁶⁾ verfolgten diese Erscheinung weiter und konnten wirklich Bleipräparate darstellen, die sich chemisch rein erwiesen, die aber eine erhebliche Elektronenstrahlung aussenden, und zwar sowohl α - als β -Strahlen. Die Aktivität dieser Präparate konnte einige Tausend französische Einheiten erreichen, einzelne derselben geben ein helles Fluoreszenzlicht. Selbstverständlich rührt diese Aktivität des sog. Radiobleis nicht vom Blei selber her (denn gewöhnliches Blei ist keineswegs radioaktiv), sondern von irgend einer unmessbar kleinen Menge eines unbekanntes, radioaktiven Körpers, der chemisch von Blei nicht zu trennen und auch spektroskopisch nicht auffindbar ist. Im Gegensatz zu Polonium und Radiotellur hat sich in den paar Jahren, während denen das Radioblei studiert wurde, keine Abnahme seiner Radioaktivität feststellen lassen⁵⁰⁾, was freilich nicht ausschliesst, dass es doch auch eine langsame Abklingung aufweise. In gewisser Beziehung verhält sich das Radioblei wie ein primär radioaktiver Körper, der — allerdings ohne deutliche Elektronenstrahlung — beständig einen andern Körper abscheidet (analog dem Uran X, das aus dem Uran entsteht); erst dieser andere Körper gibt die starke β -Strahlung des Radiobleis ab und wandelt sich dabei in eine Substanz, die wohl nichts anders ist als Radiotellur oder Polonium.

Mischt man eine Radiobleisalzlösung mit Wismuthnitrat⁵¹⁾ und scheidet nachher das Bleisalz chemisch ab, so ist die ganze Aktivität an die Wismuthlösung übergegangen. Das Bleisalz hat zunächst nur noch Spuren einer schwachen α -Strahlung, aber keinerlei β -Strahlung mehr. Doch bald ändert sich das Verhältnis; nach etwa drei Tagen ist die β -Strahlung des Bleisalzes wieder deutlich, nach einigen Wochen ist die primäre β -Aktivität wieder völlig hergestellt und der Prozess kann beliebige Male neu inszeniert werden. Das Wismuthsalz dagegen, das anfangs kräftig aktiv geworden war, verliert allmählich seine β -Strahlung, nach einigen Wochen ist dieselbe verschwunden, es behält nur noch α -Strahlung, die im Laufe der Monate langsam abklingt. Diese übrig bleibende α -Strahlung rührt jedenfalls von dem letzten Umwandlungsprodukt her, das nach Versuchen von *Meyer* und *v. Schweidler*⁵²⁾ wohl nur Radiotellur, resp. Polonium sein kann. Durch Auflösen von Radiobleisalzen und Eintauchen verschiedener Metallbleche (Silber, Palladium, Blei), auf denen sich die sekundären Produkte des Radiobleis niederschlagen, konnten sie deutlich zeigen, dass aus dem Radioblei eine Substanz abgeschieden wird, die sehr kräftig β -Strahlen aussendet, die aber schon in ungefähr sieben Tagen die Hälfte ihrer Aktivität verliert, indem sich aus ihr eine andere Substanz bildet, die nur α -Strahlen gibt, und deren Halbwertszeitkonstante zu etwa 135 Tagen bestimmt wurde; dadurch ist aber jene Substanz durchaus als Polonium oder Radiotellur charakterisiert.

3. Die langsamen Umwandlungsprodukte des Radiums.

Wenn ein Körper durch längere Berührung mit Radiumemanation induziert aktiv geworden ist, und die Abklingung dieser Aktivität, d. h. des Radiums A, Radiums B und Radiums C ist erfolgt, so bleibt doch noch eine kaum messbare Spur von Strahlung zurück, die schon von *Curie* aufgefunden wurde, und die $\frac{1}{20\,000}$ bis $\frac{1}{1\,000\,000}$ der anfänglichen Aktivität ausmacht. *Rutherford*⁵⁴⁾ hat das Studium dieser Restaktivität unternommen und ist dabei zu interessanten Schlüssen gelangt, die sich immer mehr zu bestätigen scheinen.

Das Umwandlungsprodukt des Radiums C ist das Radium D, von dem früher bemerkt wurde, dass es praktisch genommen inaktiv ist. Genauer betrachtet findet sich jedoch, dass der mit Radium D versehene Körper noch α - und β -Strahlen aussendet. Verfolgt man diese Strahlungen lange Zeit hindurch, so ist zunächst ein sofortiges, spontanes Wachstum der β -Strahlung zu konstatieren, die nach 6 Tagen ungefähr die Hälfte ihres Endbetrages erreicht und nach ca. 40 Tagen eine scheinbar konstante Intensität hat. Gleichzeitig, aber viel langsamer, entwickelt sich auf der Substanz eine schwache α -Strahlung. Aus dem Verlauf ihres Wachstums, dessen Ende noch nicht beobachtet werden konnte, schliesst *Rutherford* auf eine Halbierungskonstante von etwa 143 Tagen. Es entstehen demnach aus dem Radium D offenbar zwei neue Umwandlungsstufen: das Radium E, das sich unter lebhafter β -Strahlung in kurzer Zeit zersetzt, in 6 Tagen auf den halben Wert sinkend, und sein Zerfallprodukt, das Radium F, das nur noch α -Strahlen erzeugt und bedeutend langsamer (in 143 Tagen um die Hälfte) seine Umwandlung vollführt, dabei das definitive, inaktive Endprodukt“ der ganzen Radiumentwicklung liefernd.

Dieses Radium F, das nur α -Strahlen aussendet, das zudem mit besonderer Vorliebe auf Wismuthplatten sich niederschlägt, das eine Halbierungskonstante von ca. 143 Tagen hat, stimmt in so vielen Beziehungen mit dem Radiotellur überein, dass die Identität dieser beiden Substanzen kaum zu bezweifeln ist. Dann aber muss die Muttersubstanz des Radiums F, nämlich das Radium D, mit dem Radioblei identisch sein und in der Tat sind die Eigenschaften des letzteren wesentlich diejenigen des Radiums D. Aus theoretischen Erörterungen folgert *Rutherford* für das Radium D eine sehr langsame Abklingung, die erst in ca. 40 Jahren die Hälfte des Anfangswertes erreichen soll.

Das Problem des Poloniums, Radiotellurs und Radiobleis würde sich demnach in folgender, einfacher Weise lösen: In der Pechblende, dem Hauptmaterial für Radiumgewinnung, vollzieht sich der Umwandlungsprozess des Radiums seit Jahrtausenden. Stetig bildet sich neue Emanation, rasch folgen die kurzlebigen Umwandlungsstufen des Radiums A, Radiums B

und Radiums C aufeinander und das entstehende Radium D haftet nun mit besonderer Affinität an den in der Pechblende auftretenden Bleisalzen und verwandelt dieselben zu sog. Radioblei. Beständig zerfällt aber das Radium D weiter, rasch verklängt sein Radium E und das neue Produkt, Radium F, schlägt sich hauptsächlich an den Wismuth- und Tellursalzen des Gesteines nieder und kann mit denselben als Polonium oder Radiotellur gewonnen werden. — Natürlich hat sich im Laufe der Zeiten ein stationäres Gleichgewicht hergestellt; so viel von dem einen Produkt zerfällt, so viel wird auch sofort neu gebildet, so dass stets ein bestimmtes Quantum Radioblei oder Polonium aus der Pechblende gewonnen werden kann — ein Quantum, das erst, wenn es isoliert ist, merkbar abzuklingen beginnt und allmählich völlig verschwindet.

Noch seien hier diese langsamen Umwandlungsprodukte tabellarisch zusammengestellt :

	<i>H. C.</i>	<i>Strahlen</i>
Radium D (Radioblei)	40 Jahre	keine
Radium E	6 Tage	β -Strahlen
Radium F (Polonium, Radiotellur)	143 Tage	α -Strahlen

C. Das Aktinium und das Emanium.

Die Pechblende, jene unerschöpfliche Quelle der Radioaktivität, enthält nicht nur Uran, Thor, Radium und seine Umwandlungsprodukte, sondern mit seinen Thorsalzen innig gemengt ist eine neue, radioaktive Substanz, die zwar weder durch Atomgewichtsbestimmung, noch spektroskopisch, noch chemisch-analytisch als neues Element festgestellt werden konnte, deren eigenartige Natur jedoch bis zur Stunde die Annahme eines wirklichen chemischen Elementes verlangt.

A. Debierne fand a. 1899, dass in den Thorabscheidungen der Pechblende eine Substanz sich vorfand, die etwa 5000 mal aktiver war als Uran oder als Thor. Er nannte sie *Aktinium*. Die charakteristische Eigenschaft dieses ausserordentlich schwer in reinem Zustande zu erhaltenden Elementes ist die Erzeugung einer sehr wirksamen Emanation, die allerdings von ganz kurzer Lebensdauer ist: in wenigen Sekunden ist sie schon

um die Hälfte abgeklungen. — Unabhängig von *Debiérne* entdeckte *Giesel* a. 1902 in der Pechblende ein der Cer-Gruppe angehöriges, dem Lanthan ähnliches Element, dessen Aktivität (im Gegensatz zu Polonium) konstant war und das durch seine verhältnismässig bedeutende Emanationsausscheidung sich auszeichnete; er nannte die Substanz *Emanationskörper* oder *Emanium*⁵⁵). Die späteren Vergleiche zeigten bald, dass die zwei Elemente, Aktinium und Emanium, in enger Beziehung stehen müssen und im Grunde identisch seien. Nach Untersuchungen von *Marckwald*⁵⁶), die zum Teil durch *Giesel*⁵⁷) bestätigt wurden, konnte aus Pechblende-Rückständen ein Thorpräparat abgeschieden werden, das kräftig Emanation abgibt, das also *Debiérne*'sches Aktinium enthält; aus den gleichen Rückständen wurde nach *Giesel*'s Methode Didymlanthanoxyd gewonnen, das nicht emanierete, also kein Emanium zu enthalten schien. Nach einigen Monaten jedoch änderten sich die Verhältnisse; allmählich büsste das aktiniumhaltige Thor sein Emanationsvermögen ein, das inaktive Didymlanthanoxyd dagegen begann immer mehr Emanation auszugeben, also einen zunehmenden Gehalt an Emanium aufzuweisen. Die Verhältnisse würden demnach ähnlich liegen, wie bei dem Uran und Uran X. Das *Giesel*'sche Präparat (verwandt mit Lanthan) würde den primär aktiven Körper darstellen, der selber keine Emanation erzeugt, sondern sich zuerst in den sekundär aktiven Körper *Debiérnes*, der mit den Thorsalzen verwandt ist, umwandelt. Erst dieser neue Körper, der als Aktinium X oder Emanium X aufzufassen ist, würde die Emanation produzieren und den Anlass zu der ganzen Umwandlungsserie des Aktiniums liefern. Neuere Messungen von *Godlewski*⁵⁸) und von *Meyer* und *v. Schweidler*⁵⁹) geben folgenden Zerfallprozess an: Das primäre Aktinium (oder Emanium) zerfällt — und zwar ohne merkliche Strahlung — in Aktinium X. Dieses transformiert sich, in 10,2 Tagen auf die Hälfte sinkend, unter allgemeiner Elektronenstrahlung, die neben den α -Strahlen auch deutlich β - und sogar γ -Strahlen mitführt, in Emanation. Jene in grosser Menge auftretende Emanation klingt schon in 3,7 Sekunden auf die Hälfte ab, unter beständiger α -Strahlung. Sie verwandelt sich rasch in zwei aufeinanderfolgende, induzierte Aktivitäten: Aktinium A, das in 36 Minuten auf die Hälfte sinkt, und ohne

merkliche Strahlung in Aktinium B übergeht. Letzteres gibt wieder die gesamte α -, β - und γ -Strahlung und bildet, mit einer Halbwertszeitkonstante von etwa 1,5 Minuten, den Schluss der Aktinium-Evolution. Zusammengestellt ergibt sich folgende Tabelle :

	<i>H. C.</i>	<i>Strahlung</i>
Aktinium	—	keine
Aktinium X	10,2 Tage	α -, β -, γ -Strahlen
Emanation	3,7 Sekunden	α -Strahlen
Aktinium A	36 Minuten	keine
Aktinium B	1,5 Minuten	α -, β -, γ -Strahlen

Das Aktinium ist ein ausserordentlich kräftiges, radioaktives Präparat. Seine Salze zeigen meist ein helles Fluoreszenzlicht, das zahlreiche Spektrallinien liefert. Gewisse Abnormitäten im Verhalten des Aktiniums sind noch nicht ganz aufgeklärt, rühren aber hauptsächlich daher, dass es kräftig Emanation erzeugt, und dass diese Emanation von sehr kurzer Lebensdauer ist und auch induzierte Aktivitäten niederschlägt, die nicht langen Bestand haben. Dies gibt zu interessanten Versuchen Anlass, die bei der Intensität, die die Aktinium-Emanation besitzt, sehr deutlich sichtbar sein sollen. Das Aktiniumpräparat wird in einer Papierschachtel aufbewahrt, die Emanation dringt dann durch die Poren derselben hindurch und kann vermittelst seines schwachen Luftstromes gegen einen grossen Schirm von Sidotblende geblasen werden. Wie eine leuchtende, glitzernde Wolke zieht es sich dann vor dem Schirme hin: die Emanation erzeugt starke Fluoreszenz, die aber nur einige Sekunden andauert und deshalb zu diesem flackernden Leuchten Anlass gibt.

D. Das Thorium und das Radiothorium.

Das Thorium ist wie das Uran ein schon längere Zeit bekanntes, chemisch vierwertiges Element, vom Atomgewicht 232,5 ($O = 16$), das in neuerer Zeit durch die Auerbeleuchtung eine grössere praktische Bedeutung erlangt hat.

Seine Radioaktivität wurde früher als diejenige der typischen, radioaktiven Elemente entdeckt; weshalb es hier erst

am Schlusse besprochen wird, hat seinen Grund darin, dass die die Thoraktivität bedingende Substanz erst in allerneuester Zeit durch die Entdeckung des *Radiothorium*s durch *Ramsay* a. 1905 (unter Mithilfe von *O. Hahn* und *O. Sackur*⁵⁹) aufgefunden wurde.

Das Studium der Thoraktivität ist ganz besonders von *E. Rutherford* betrieben worden, und seine meisten fundamentalen Entdeckungen knüpfen an Eigenschaften der Thorsalze an.

Am Thorium wurde zuerst die Abscheidung des Thor X ausgeführt und dessen Wesen erkannt. Fällt man nämlich eine Thorsalzlösung mit Kali- oder Natronlauge, so bleibt die ganze Radioaktivität in dem Thorhydroxid und die filtrierte Lösung ist inaktiv. Fällt man jedoch die Lösung mit Ammoniak im Ueberschuss, so ist die Aktivität fast ganz aus dem Thorhydroxid in die Lösung übergegangen; dampft man dieselbe ein, so bleibt ein minimaler Rückstand (der ausschliesslich aus Verunreinigungen besteht), der die ganze Aktivität in sich konzentriert hat. Dieser Rückstand enthält offenbar in unwägbar geringer, chemisch gar nicht mehr nachweisbarer Menge das Thorium X. Wirklich zeigt sich bald der bekante Prozess: Das anfänglich inaktive Thoriumhydroxid gewinnt bald wieder neue Aktivität und regeneriert sich vollständig, es bildet also die wirklich primär-aktive Substanz; das Thor X hingegen wird immer schwächer aktiv, nach ca. 4 Tagen hat es nur noch die halbe Aktivität, nach wenigen Wochen ist es spurlos verschwunden.

Am Thorium wurde zuerst das Auftreten der Emanation beobachtet. Obgleich das Thorium ein schwach radioaktiver Körper ist (ungefähr gleich aktiv wie das Uran), so konnte doch seine Emanation viel leichter beobachtet werden, als bei dem Radium, weil erstere beständig aus dem Präparat entweicht und durch einen schwachen Luftstrom weggeblasen werden kann, während die Radiumemanation nur spurweise aus den Radiumkrystallen austritt. Freilich muss die Thoremation beständig erneuert werden, denn sie klingt schon in 54 Sekunden auf die Hälfte ab.

Am Thorium konnte auch das Auftreten der induzierten Aktivität leichter beobachtet werden, weil sie von längerer

Lebensdauer ist, wie bei andern Substanzen. Die zwei Umwandlungsstufen, die sich sukzessive an den Körpern bilden, die mit Thoremanation in Berührung stehen, sind das Thor A, das erst in 11 Stunden auf die halbe Aktivität abklingt, wahrscheinlich ohne merkliche Strahlung, und das Thor B, das eine Halbierungskonstante von 55 Minuten besitzt und die typische Gesamtstrahlung der α -, β -, γ -Strahlen von sich gibt.

Am Thorium konnte auch eine praktisch bedeutsame Erscheinung festgestellt werden, die hier angeführt werden soll. Ein in Emanation gelegter Körper kann nämlich in kurzer Zeit eine verhältnismässig starke, induzierte Aktivität aufnehmen, wenn er während seiner Expositionsdauer auf ein hohes, negatives Potential geladen wird. Dadurch wird gleichsam die Wirkung der Emanation auf den Körper konzentriert und die Ablagerung von induzierter Aktivität geht weitaus rascher vor sich, als ohne solche elektrische Ladung. Es erweckt diese Beobachtung den Anschein, als ob die Emanation selber aus elektrisch positiv geladenen Molekülen bestehen sollte, die dann naturgemäss von einem negativen Körper angezogen werden. Es müssen aber jedenfalls hier andere, kompliziertere Verhältnisse vorliegen; denn aus mehrfachen, gründlichen Untersuchungen hat sich ergeben, dass die Emanation, sowohl des Radiums als des Thoriums, stets elektrisch neutral sei.

Galt bisher das Thorium als ein primär-radioaktiver Körper, und war man über die Beobachtungen von *Hofmann* und *Zerban*⁴¹⁾, welche inaktives, reines Thorium dargestellt hatten, sowie über die Versuche von *Baskerville*, der in dem Thorium zwei neue Substanzen, das Carolinium und das Berzelium entdeckt haben wollte, einfach zur Tagesordnung geschritten, so musste diese Auffassung doch zuletzt fallen gelassen werden. *Ramsay*⁵⁹⁾ konnte a. 1905 mit Bestimmtheit nachweisen, dass in den gewöhnlichen, radioaktiven Thorpräparaten immer eine gewisse Substanz beigemischt sei, die allerdings chemisch fast nicht vom Thorium zu trennen ist, die aber doch die alleinige Ursache seiner Radioaktivität sein kann und die er *Radiothorium* nannte.

Diese Entdeckung sei hier kurz skizziert:

Zu Beginn des Jahres 1904 wurde ein in Ceylon neu entdecktes, ausserordentlich thorhaltiges Mineral (77 % Thorerde)

der *Thorianit*, in einer ~~Gesamtmenge~~ Menge von ungefähr 250 kg einer genauen Untersuchung unterworfen. Der ausnehmend grosse Thorgehalt, die starke Radioaktivität und endlich die überraschend grosse Heliummenge, die daraus erhältlich war (es konnte etwa 1 m³ Helium aus der Gesamtmasse gewonnen werden), liessen eine solche Untersuchung wünschbar scheinen. Zunächst wurden aus dem Thorianit die Barium- und damit auch alle Radiumsalze ausgeschieden, also vollständig getrennt von dem Thorium. Es wurden etwa 18 gr Bariumcarbonat gewonnen, die merklich radiumhaltig sein sollten, da ihre Aktivität etwa 500 französische Einheiten betrug. Nach roher Schätzung mochten etwa 9 mgr Radiumsalz darinnen vorhanden sein. Die fraktionierte Krystallisation zeigt jedoch, dass neben dem Radiumgehalt noch eine andere, radioaktive Substanz verborgen sein muss. Es gelang wirklich, wenn auch mit grosser Mühe, das wirkliche Radium von jener neuen Substanz zu trennen und dieselbe passend zu konzentrieren. Die also isolierten Stoffe, von denen *O. Hahn* auf etwas verschiedene Weise zwei Präparate darstellen konnte, das eine von 10,9 mgr, das andere von 2,7 mgr Gewicht, besaßen zuletzt eine Radioaktivität von 260,000—690,000 Uraneinheiten, also eine Strahlung, die nur von sehr reinen Radiumpräparaten überholt wird.

Das Verhalten dieser neuen Substanzen wurde allseitig geprüft. Ihre chemischen Eigenschaften sind wesentlich diejenigen der seltenen Erden. Ihre Aktivität zeigte je länger je je mehr vollständige Uebereinstimmung mit derjenigen der bekannten Thorpräparate: Durch Behandeln mit Ammoniak wurde der sekundär radioaktive Bestandteil abgeschieden, seine Aktivität sank in 4 Tagen auf die Hälfte — genau wie bei Thor X. Eine Abgabe von Emanation war von Anfang an leicht beobachtbar, sie zeigte deutlich den raschen Abfall der Thor-Emanation, aber doch keineswegs etwa das sofortige Abklingen der Aktinium-Emanation. Die induzierte Aktivität, das Auftreten, zuerst von α -Strahlen, dann von β -Strahlen, alles das erfolgte nach den beim Thorium bekannten Gesetzen.

Dass mit diesen enorm aktiven Präparaten und ihrer intensiven Emanation (die im Gegensatz zu derjenigen des Radiums beständig ausströmt) eine ganze Reihe überraschender Demonstrationsversuche ausführbar waren, ist selbstverständlich.

Besonders die α -Strahlung dieses Radiothors ist überaus stark und deshalb sind die Leuchtwirkungen auf Zinksulfid noch viel schöner als bei Radiumbestrahlung. Die Substanz, in Papier gewickelt und auf einen Zinksulfidschirm (Sidotblende) gelegt, entwickelt beständig Emanation, die durch das Papier hindurchdringt und deren Hin- und Herwogen auf dem aufblitzenden Schirme deutlich wahrnehmbar ist. Bläst man Emanation durch eine Röhre über verschiedene Zinksulfidschirme, so beobachtet man den Fortgang der Emanation an dem sukzessiven Aufleuchten der Schirme. Seltsam war es zu konstatieren, wie die Emanation beständig aufwärts steigt und nicht, wie es ihrem hohen Atomgewicht entsprechend zu erwarten wäre, herunter sinkt. Auch Kondensation in flüssiger Luft liess sich nachweisen usw.

Wenn somit jene Substanz alle radioaktiven Eigenschaften des Thoriums besitzt, aber in bedeutend verstärkter Weise, so darf wohl geschlossen werden, dass sie das eigentliche, radioaktive Substrat des Thoriums sei, und dass Thorsalze nur soweit aktiv seien, als sie jenes Substrat in winzigen Quantitäten mit sich führen. Dies würde die frühern Beobachtungen, wonach aus gewissen Mineralien inaktives Thor erhältlich wurde, erklären; es würde auch verständlich machen, wieso *Giesel*⁶⁰⁾ aus Auerstrümpfen ein Präparat von der Aktivität 10 herausarbeiten konnte, das doch von chemischem Thor durchaus frei war. Diese Substanz verdient demnach voll und ganz ihren Namen: *Radiothorium*. Nach *O. Hahn* wäre dasselbe selber ein Umwandlungsprodukt des primären Thors und die Entwicklungsreihe des Thors würde durch folgende Tabelle gegeben:

	<i>H. C.</i>	<i>Strahlung</i>
Thorium	—	—
Radiothorium	ca. 10 ⁹ Jahren	α -Strahlen
Thor X	4 Tage	α -Strahlen
Emanation	54 Sekunden	α -Strahlen
Thor A	11 Stunden	keine Strahlen
Thor B	55 Minuten	α -, β -, γ -Strahlen

IV. Die Emanation.

A. Die allgemeinen Eigenschaften der Emanation.

In den vorigen Abschnitten ist der Emanation schon wiederholt gedacht worden; wenn ihr hier ein besonderes Kapitel gewidmet wird, so soll dasselbe nur den Zweck haben, wesentlich die Eigenschaften und Untersuchungen aufzuzählen, die den *Charakter der Emanation als materielles Gas* wahrscheinlich machen. Eine kurze, vortreffliche Zusammenstellung dieser Eigenschaften gibt *Himstedt*⁶¹⁾ im Jahrbuch der Radioaktivität. Wir werden diese vorzüglichen Ausführungen hier wiederholt benützen.

Die Emanation zeigt vor allem aus ihren gasförmigen Charakter durch ihre Fähigkeit, poröse Körper, wie Papier und ganz dünne Aluminiumfolie (die sicher Poren enthält) zu durchdringen, während Glas von minimalster Dicke sie zurückhält. Die Emanation *diffundiert* in Luft hinein, wie ein Gas. Natürlich ist die Bestimmung des Diffusionscoefficienten bedeutend schwieriger als bei andern Gasen, weil die durch eine Oeffnung hindurchgetretene Emanationsmenge nur indirekt durch ihre Strahlung gemessen werden kann. *Rutherford* und *Miss Brooks* finden als Diffusionscoefficienten der Radium-Emanation den Wert 0,07, *Curie* und *Danne* 0,10. Diese Zahlen sind insofern von Bedeutung, als aus denselben ein Schluss auf das Molekulargewicht der Emanation gezogen werden darf. Nach Versuchen von Graham ist bekanntlich das Molekulargewicht eines Gases der Quadratwurzel aus seinem Diffusionscoefficienten umgekehrt proportional. Gilt auch das Gesetz nur in roher Annäherung, so kann doch daraus ein Anhaltspunkt durch Vergleich mit der Diffusion der Kohlensäure erhalten werden. Freilich weichen die Resultate erheblich ab; aus *Rutherfords* Versuchen ergibt sich als Molekulargewicht etwa 170, aus denen *Curies* etwa 80. Nach neueren Messungen von *Makower*⁶²⁾ sollen Thorium- und Radiumemanation nahezu dasselbe *Molekulargewicht* haben, ca. 98, bezogen auf $H = 2$.

Auf den Gascharakter der Emanation weisen die Versuche von *Curie* und *Danne* hin: Zwei Gefässe standen miteinander in Verbindung und wurden mit Emanation angefüllt; wurde das eine Gefäss auf einer Temperatur von 10° C. gehalten, das andere auf 350° C. gebracht, so zeigte sich, dass die Emanation sich in den zwei Gefässen gemäss dem Gay-Lussac'schen Gasgesetze verteilte. Aehnliche Versuche hat *Himstedt* gemacht: Von zwei kommunizierenden Gefässen war das eine auf Zimmertemperatur gehalten, das andere in flüssige Luft getaucht. Die Emanation liess sich durch Vertauschen der Temperaturen wiederholt aus dem wärmeren in das auf -190° C. abgekühlte Gefäss herüberdestillieren. Derartige Erscheinungen können bei grösseren Emanationsmengen ohne eigentliche Messinstrumente durch ihre blosse, intensive Leuchtwirkung beobachtet werden. Die Emanation zeigt alle Eigenschaften der Radioaktivität: Ionisierung der Luft, photographische Wirkung, Fluoreszenzerregung. Letztere kann so stark sein, dass die Glaswände der Versuchsgefässe zu hellem Leuchten angeregt werden, je nach Umständen so kräftig, dass man in diesem Lichte noch eine Uhr ablesen kann. Diffundiert dabei die Emanation durch eine feine Röhre aus einem Gefäss in ein anderes, so beobachtet man die Bewegungen der Emanation an dem langsam in der Röhre fortschreitenden Fluoreszenzschimmer. So lässt sich unmittelbar aus der Helligkeit dieses Lichtes ein Urteil über die vorhandene Emanationsmenge bilden. Ist gar Zinkblende in den Gefässen eingelassen, so beginnt eine glänzende Fluoreszenzerregung, sobald die Emanation dazu gelangt. Sogar Papier, Wolle und andere Körper sollen durch intensive Emanation zum Leuchten gebracht worden sein.

Eine weitere Gaseigenschaft der Emanation ist die bereits angedeutete *Kondensierbarkeit*, die sofort eintritt, wenn ein Gefäss mit Emanation in flüssige Luft getaucht wird. Natürlich ist die Emanation immer nur in so geringen Quantitäten vorhanden, dass sie als flüssige Menge nicht mehr nachweisbar ist; ihre Verflüssigung wird indirekt bewiesen dadurch, dass bei einer bestimmten Temperatur die radioaktiven Wirkungen (Ionisierung und Fluoreszenzerregung) auf einmal aus dem betreffenden Gefäss verschwinden. Bei Erwärmung des Gefässes fangen sie wieder an spürbar zu werden. Jene Tem-

peratur ist offenbar die Kondensationstemperatur der Emanation. *Rutherford* und *Soddy* haben a. 1903 diese Temperaturen bestimmt: -150° für Radium-Emanation, -120° für Thorium-Emanation.

Jede Flüssigkeit besitzt, wie für ein Gas, so auch für die Emanation, einen bestimmten Absorptionscoefficienten. Auch diese Tatsache ist durch Versuche festgestellt worden.

Immerhin sind alle diese Erstlingsversuche noch lange nicht beweisend für die Gasnatur der Emanation gewesen. Zwar scheint die eine, eigentümliche Beobachtung von *Curie* und *Debierne*, wonach Radium in ein möglichst hohes Vacuum gebracht, keine Emanation abgibt (die Emanation könnte somit nur auftreten, wenn ein materielles Gas als Träger derselben vorhanden ist), darauf zurückzuführen zu sein, dass das einmal ent-emanierete Radium erst im Laufe einiger Tage merkliche Emanation produziert und deshalb anfangs im Vacuum emanationsfrei ist. Aber dessen ungeachtet blieben stets drei gewichtige Bedenken bestehen: Es konnte kein Spektrum der Emanation gefunden werden; es konnte kein besonderer Gasdruck der Emanation nachgewiesen werden, d. h. ob Emanation in einem Gase in grösseren oder in kleineren Mengen vorhanden war oder gar nicht, gab keine Aenderung in dem Drucke des betreffenden Gases; endlich war es unerklärlich, wie ein materielles Gas im Laufe einiger Tage oder Wochen spurlos verschwinden konnte.

B. Heliumbildung, Spektrum und Volumen der Emanation.

Die Versuche von *Ramsay*, ausgeführt teils mit *Soddy*, teils mit *Collie* a. 1903, sollten — nach Ueberwindung enormer Schwierigkeiten — die obigen Einwände entkräften. Vor allem aus wurde nachgewiesen, dass die Emanation nicht vollständig in Nichts aufgelöst wird, sondern einen chemisch wohl definierten Rückstand hinterlässt, nämlich das durch *Ramsay* selber entdeckte Gas, das *Helium*.

Ueber jene Heliumversuche und deren spätere Bestätigung berichtet *Himstedt* (l. c. p. 142):

«*Ramsay* und *Soddy* haben die Gase, welche sie beim Auflösen von 20 resp. 30 mgr Giesel'schen RaBr_2 in Wasser

erhielten, von Wasserstoff und Sauerstoff nach bekannten Methoden getrennt und in ein Vacuumrohr geleitet. Dasselbe zeigte nach ihren Angaben das Spektrum von CO_2 , nachdem aber ein Teil des Rohres in flüssige Luft gesteckt war, traten die charakteristischen Linien des Heliums deutlich hervor. Hieraus lässt sich zunächst nur schliessen, dass das Radiumpräparat Helium enthalten hat. Erwägt man, dass die Ursubstanz, aus der das Präparat hergestellt ist (die Pechblende), Helium enthält, so lässt sich der Einwand nicht von der Hand weisen, dass möglichenfalls in dem Präparat etwas «verschlepptes» Helium sich befunden habe. Aber die genannten Forscher haben dann weiter den Maximalbetrag von Emanation, der aus 50 mgr RaBr_2 zu gewinnen war, mit Sauerstoff in ein in flüssiger Luft gekühltes Rohr, in dem sich die Emanation kondensieren musste, hinübergeleitet, haben den Sauerstoff weggepumpt und das Rohr abgeschmolzen. Es war keine Heliumlinie zu sehen, aber nach vier Tagen und noch deutlicher nach fünf Tagen konnten die gelbe, die grüne, zwei blaue und eine violette Linie festgestellt werden. Die Verfasser schliessen hieraus, und wie mir scheint, mit vollem Recht, dass die Emanation sich umgewandelt hat in Helium. Will man allerdings ganz skeptisch sein, so wird man auch jetzt noch einwenden können: Da bei den ersten Versuchen aus der RaBr_2 Lösung Helium herausgekommen ist, so kann dies auch jetzt noch der Fall gewesen sein und das Helium-Spektrum ist bei dem letzten Versuche anfangs nur deshalb nicht hervorgetreten, weil der diesmal besonders grosse Betrag von Emanation die Leitung des Stromes der Hauptsache nach übernommen hat, und erst als nach fünf Tagen die Emanation zum Teil verschwunden war, etwa okkludiert oder in Verbindung gegangen mit der Glaswand, hat das Spektrum des von Anfang an vorhandenen Heliums hervortreten können. Aber selbst wenn man diesen Einwand erheben wollte, müsste man doch dem Versuche volle Beweiskraft für die gasförmige Beschaffenheit der Emanation zusprechen.»

«*Curie* und *Dewar* haben die beträchtliche Menge von ca. 0,42 gr RaBr_2 in ein Quarzrohr gefüllt, das unter Zwischenschaltung von in flüssige Luft tauchenden U-Röhren mit einer Quecksilberpumpe verbunden war und längere Zeit evakuiert

wurde. Das Radiumpräparat wurde, um nach Möglichkeit alle Gase und alle Emanation auszutreiben, längere Zeit auf Rotglut erhitzt, und nachdem mit der Pumpe wieder ein möglichst hohes Vacuum hergestellt war, wurde das Quarzrohr mit dem Radium abgeschmolzen. In den abgesaugten Gasen konnte kein Helium nachgewiesen werden und zwar wohl um deswillen nicht, weil die übrigen Gase prozentisch zu sehr überwogen. Das abgeschmolzene Quarzrohr zeigte alle Linien des Heliums. *Curie* und *Dewar* machen darauf aufmerksam, dass die Frage, ob vom Radium fortgesetzt Helium produziert wird, sich erst dann wird entscheiden lassen, wenn nach längerer Zeit sich feststellen lässt, dass der Betrag Helium im Quarzrohre zugenommen hat.»

«*F. Himstedt* und *G. Meyer* haben 50 mgr Giesel'sches RaBr_2 in einem Glasrohre an die Kalbaum'sche Quecksilberpumpe gesetzt und mehrere Stunden aufs äusserste evakuiert. Darauf wurde durch einen über das Radium geleiteten Wasserstoffstrom die Emanation vier Tage lang in ein Geissler'sches Rohr geleitet, das sich in flüssiger Luft befand und dessen beide Elektroden mit einander verbunden und an -4000 Volt gelegt waren. Das Entladungsrohr wurde vom Radium abgeschmolzen und während es noch in flüssiger Luft blieb, soweit als möglich evakuiert und zugeschmolzen. Aus der flüssigen Luft genommen, zeigte dasselbe das primäre und sekundäre Wasserstoffspektrum und besonders im blauen Teile ziemlich helle CO Banden, von Helium war keine Spur zu entdecken. Das Rohr enthielt eine grosse Menge Emanation, denn es leuchtete sehr stark. Nach acht Wochen, als das Leuchten bedeutend abgenommen hatte, wurde mit Hilfe eines Rowland'schen Konkavgitters eine photographische Aufnahme des Rohres gemacht, zu welchem Zwecke das Rohr 29 Stunden lang mit ziemlich starkem Induktionsstrom getrieben wurde. Auch auf der Photographie war keine Heliumlinie aufzufinden. Das Rohr war am 12. Dezember abgeschmolzen, Ende Februar ergab die Beobachtung zum erstenmale den Eindruck, als ob die D_3 -Linie angedeutet sei, in der ersten Aprilwoche war sie sicher zu konstatieren und seit Mitte Mai sind die roten, gelben, grünen und blauen Heliumlinien sichtbar. Die ersten drei heben sich als scharfe Linien von dem dunklen Untergrunde

ab, die blauen und violetten Linien treten weniger hervor, weil an dieser Stelle, wie erwähnt, das Rohr ziemlich hellen Untergrund hat».

In ihrer neuesten Arbeit⁶³⁾ weisen *Himstedt* und *Meyer* darauf hin, dass auch die letzten Zweifel an der Heliumbildung aus Emanation nicht mehr haltbar sind, so dass diese eigenartige Entstehung des Heliums als wohl gesicherte Tatsache anzusehen ist. Es wurden unter anderem 40 mgr reines RaBr_2 in einem langen Quarzrohr im Vacuum so stark erhitzt, dass die Krystalle sublimierten und am andern Ende der Röhre sich niederschlugen. Wenn demnach irgend eine Spur Helium in dem RaBr_2 okkludiert gewesen wäre, so müsste dasselbe frei geworden sein. Die Röhre wurde sodann mit reinem Wasserstoff ausgewaschen, nochmals evakuiert, das Radium zurücksублиmiert, wieder gewaschen, noch einmal evakuiert; dass jetzt noch verschlepptes Helium vorhanden sei, ist undenkbar. Anfangs zeigte die zugeschmolzene Quarzröhre keinerlei Heliumspur — nach 6 Wochen, ohne irgendwelche Erwärmung der Röhre, war das Helium-Spektrum wahrnehmbar.

Ist demnach die Heliumbildung aus Radium unzweifelhaft, so liegen auch bestimmte Anhaltspunkte vor, wonach aus jeder radioaktiven Substanz Helium entsteht. Auf die enormen Heliummengen im Thorianit wurde früher hingewiesen (p. 46); dieselben sind jedenfalls ein Zerfallprodukt des Radiothoriums. Wiederum hat *Debierne* gefunden, dass Aktinium stetsfort merkliche Quantitäten Helium erzeugt. Endlich ist die Tatsache zu erwähnen, dass alle Minerale, aus denen gewöhnlich das Helium (als okkludiertes Gas) gewonnen wurde, radioaktive Minerale sind.

*Ramsay*⁶⁴⁾ hat die beiden andern Einwände (p. 50) gegen die Gasnatur der Emanation ebenfalls widerlegt.

Zunächst hat er das *Spektrum der Emanation* nachgewiesen. Aus einer Lösung von RaBr_2 in destilliertem Wasser entwickelt sich stetsfort eine ganz geringe Gasmenge, die wesentlich aus Knallgas besteht (allerdings mit einem unerklärlichen Ueberschuss von Wasserstoff). Die Lösung von 70 mgr des reinen Salzes ergab im Laufe jeder Woche etwa 8—10 mm³ Knallgas, die im Vacuum aufgefangen und untersucht wurden. Nach langwierigen Studien, die erst nach 6 Monaten

vergeblicher Bemühung zum Ziele führten, konnte die von jener Gasmenge mitgeführte Emanation isoliert, angesammelt und ihr Spektrum beobachtet werden. Freilich gelang es überhaupt nur zwei mal, jenes Spektrum wahrzunehmen; denn bald wird es durch das Wasserstoffspektrum der in der Röhre befindlichen Flüssigkeit verdeckt, nach einiger Zeit ist es überhaupt durch das Heliumspektrum ersetzt, Diese zwei Beobachtungen genügen jedoch zu seiner Feststellung und zu der Messung der Wellenlängen der Hauptlinien. Von den 18 angegebenen Linien sind als ziemlich stark bis sehr stark bezeichnet: 580,5; 572,5; 559,5; 510,5; 498,5 $\mu\mu$ (die drei letzten sehr stark).

Aber nicht nur das Spektrum konnte beobachtet werden, sondern es gelang auch, die reine Emanation in Form eines Gases in einer feinen Kapillare aufzufangen und durch Variation des Druckes der absperrenden Quecksilbersäule die Kompression dieses Gasvolumens zu untersuchen. Dabei zeigte sich, dass die Emanation sich durchaus wie ein gewöhnliches Gas verhält: *ihr Volumen ändert sich dem Drucke umgekehrt proportional*. Wie ausserordentlich fein diese Versuche waren, geht daraus hervor, dass das beobachtete Emanationsvolumen bei dem Normaldruck von 760 mm Quecksilber nur 0,0254 mm^3 ausmachte. Erschwert sind die Messungen auch dadurch, dass die kleine Kapillare, welche die Emanation aufnimmt, anfänglich in hellem Glanze fluoresziert, dann aber durch die Wirkung der Emanation violett, purpurn und endlich fast schwarz gefärbt wird.

Die Gasnatur der Emanation ist nach all' diesen Beobachtungen wohl als sichere Tatsache anzunehmen. *Ramsay* berechnet, dass 1 gr Radium in einer Sekunde etwa $3 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3$ Emanation abgibt, und er schlägt vor, die Emanation, die ja eine Art gasförmiges Element bildet, *Exradio* zu nennen. Natürlich bleibt eine weitaus grössere Emanationsmenge in dem Radiumpräparat okkludiert; diese Menge, die in 1 gr Radium verborgen ist, berechnet *Ramsay* zu etwa 1 mm^3 . Auch über die entstehende Heliummenge liess sich eine Schätzung ausführen: aus einem bestimmten Emanationsvolumen soll etwa das vierfache Heliumvolumen entstehen. Wie wichtig diese Zahlen trotz ihrer Unsicherheit sind, wird im Kapitel VII hervorgehen.

Ist nach dem bisherigen das allmähliche Verschwinden der Emanation insofern abgeklärt, als doch ein reeller Rückstand, das Helium, übrig bleibt (ganz abgesehen von der induzierten Aktivität, worauf später zurückgekommen wird), so muss doch jener Prozess des Abklingens etwas näher beleuchtet werden, da derselbe für das theoretische Verständnis der Radioaktivität von grösster Bedeutung ist.

C. Das Abklingen der Emanation.

Emanation mit Luft gemischt zu erhalten, ist verhältnismässig leicht. Bei dem Aktinium und Radiothorium strömt sie direkt aus den betreffenden Präparaten aus, bei Thorium sammelt sie sich über der Substanz an und kann durch sanftes Wegblasen gewonnen werden, bei Radium ist sie nur dann in merkbaren Mengen erhältlich, wenn das Radiumsalz entweder gelöst (dann erfolgt eine beständige, langsame Emanationsentwicklung) oder stark erhitzt wird (dann entweicht sie auf einmal in kräftigem Strom).

Aber sowie dieselbe aufgefangen und von ihrer Quelle entfernt wird, beginnt sofort der Umwandlungsprozess: nach einer mehr oder weniger langen Störungsperiode sinkt ihre Aktivität in regelmässiger Weise, bis sie über kurz oder lang total vernichtet ist.

Dieses Abklingen der Aktivität ist mathematisch sehr einfach darstellbar, nämlich durch eine Exponentialfunktion mit negativem Exponenten. Bezeichnet J^0 die Intensität der radioaktiven Strahlung zu der Zeit $t = 0$, d. h. etwa in dem Zeitpunkt, in welchem die Störungsperiode vollzogen ist, so wird in jedem späteren Zeitpunkt t die Intensität J gegeben durch den Ausdruck: $J = J^0 \cdot e^{-\lambda t}$, wo λ eine konstante Zahl ist, und $e = 2,718281828459 \dots$

Die Intensität J sinkt also mit der Zeit in regelmässiger Weise, wie aus der Figur p. 61 ersichtlich ist. Dasselbst sind die Zeiten als Abszissen, die Intensitäten J als Ordinaten abgetragen. Nach anfänglich steilem Abfall wird derselbe langsamer und nähert sich der Abszissenaxe asymptotisch, jedoch so stark, dass die Ordinaten schon nach verhältnismässig kurzer Zeit

unmessbar klein sind. Im Ausdruck $e^{-\lambda t}$ braucht λt nur einige Einheiten zu erreichen, um J verschwindend zu machen; schon e^{-7} ist kleiner als ein Tausendstel.

Die Dauer dieses Abfallens, des sog. *Abklingens*, ist lediglich durch die *Abklingungskonstante* λ bedingt. Die Kenntnis derselben genügt, um den ganzen Charakter des Abklingungsprozesses zu beurteilen. Natürlich ist λ eine Zahl, die je nach dem Zeitmass in reziproken Sekunden, Minuten, Stunden, Tagen oder Jahren angegeben wird. Anschaulicher als jene Zahl λ ist die Angabe der sog. *Halbierungskonstanten* (*H. C.*). Die Exponentialfunktion hat die Eigenschaft, in gleichen Teilen immer um den gleichen Bruchteil abzunehmen. Die Zeit, welche angibt, wann die Intensität der Strahlung um die Hälfte abgenommen hat, ist deshalb ebenso charakteristisch wie λ selber, und wird als Halbierungskonstante bezeichnet.

Dieselbe ist leicht erhältlich. Es sei $J = \frac{1}{2} J_0$, so folgt $\frac{1}{2} = e^{-\lambda t}$, also $\lambda t = \lg 2$, daraus $H C = \frac{1}{\lambda} \lg 2 = \frac{1}{\lambda} \cdot 0,6925$.

Nach den Messungen von *Rutherford, Sackur, Godlewski, Miss Brooks* u. a. folgt für die bisher bekannten Emanationen:

	λ	<i>H. C.</i>
Radium	0,0000208 Sekunden ⁻¹	3,85 Tage
Thorium	0,0128 “	54 Sekunden
Aktinium	0,187 “	3,7 “

Da die Emanation ein so ephemeres Dasein führt, so scheint sie von äusserster Unbeständigkeit zu sein, und man ist geneigt, dem Zahlwert von λ keine grosse Bedeutung zuzuschreiben. Dies ist jedoch ein Irrtum. Die Grösse λ erweist sich als eine in hervorragendem Masse wirklich konstante Zahl; trotz ihrer Vergänglichkeit ist die Emanation eben doch durch die Abklingungskonstante ausserordentlich scharf charakterisiert.

Die Emanation zerstört sich von selbst, aber die Art und Weise dieser Zerstörung erfolgt mit unverwüstlicher Gleichmässigkeit. Die Emanation kann den höchsten und den tiefsten Drucken unterworfen werden, sie kann über heisses Platinschwarz, über rotglühendes Bleichromat, über rotglühendes Magnesiumpulver, über rotglühenden Zinkstaub geleitet werden — ihre Abklingungskonstante ändert sich nicht. Variationen der

umgebenden Temperatur von -180° bis $+450^{\circ}$ C. ergaben nach *Curie* keinerlei Beeinflussung von λ . *Ramsay* und *Soddy* setzten die Emanation mit Sauerstoff gemischt während mehrerer Stunden über Kalilauge dem elektrischen Funkenstrom aus — die Art der Abklingung der Emanation blieb dieselbe.

Diese Beobachtungen sind deshalb bedeutsam, weil sie darauf hinweisen, dass der *Zerfall der Emanation kein chemischer Prozess* im gewöhnlichen Sinne des Wortes sein kann. Denn es ist wohlbekannt, dass chemische Zersetzungen durch die verschiedenartigen, vorhin erwähnten Einwirkungen wesentlich beeinflusst werden. Früher wurde jene Tatsache als Beweis gegen die Gasnatur der Emanation angeführt. Was sie aber wirklich beweist, ist doch wohl nur das, dass das Abklingen der Emanation nicht wie andere chemische Vorgänge aus einer blossen molekularen Umsetzung, aus einem Vertauschen der Atome von Molekül zu Molekül, besteht, sondern dass dieser Prozess tiefer in die Konstitution der Körper eingreift.

Es ist nur denkbar, dass hier die *Atome selber* in Mitleidenschaft gezogen werden. Nicht ein Zerfallen der Emanationsmoleküle (die übrigens wahrscheinlich nur einatomige Moleküle sind, wie Argon, Helium etc.) tritt hier auf, sondern eine Desaggregation der Atome selbst. Nur ein solcher Atomzerfall kann unabhängig bleiben von allen äussern Einflüssen und von der Natur des Atomes allein bedingt sein (vergl. die Ausführungen von *E. Bose*⁶⁵).

Hier liegt wohl eine der direktesten Stützen der geistreichen *Rutherford'schen Theorie des Atomzerfalles*, die im folgenden dargelegt werden wird.

V. Induzierte Aktivität und Ionenaktivität.

A. Allgemeine Beziehungen.

Was wird denn aus der Emanation bei ihrem beständigen Zerfall? Wo finden sich die Trümmer der Emanationsatome wieder? Die Antwort auf diese Fragen schien durch die Ent-

deckung der Heliumbildung gegeben, und vielfach wird noch die Ansicht vertreten, als ob dieses Helium den letzten Rest des Emanationszerfalles darstelle.

Allein, wenn der gesamte Prozess der Radioaktivität in seiner Allgemeinheit überblickt wird (wie dies im Kap. III, bei Besprechung der einzelnen, radioaktiven Substanzen geschah), so ergibt sich dabei ein wesentlich anderes Bild.

Die Emanation wird aufgefangen, z. B. in ein Glasrohr. Ihr Umwandlungsprozess beginnt und zwar unter beständiger Aussendung von α -Teilchen. Das Zerfallsprodukt jedoch ist kein Gas, sondern offenbar ein fester Körper, der in unwägbaren geringen Mengen sich niederschlägt: hauptsächlich an den Gefässwänden, dann aber auch an den herumfliegenden Staubteilchen. Dieser Niederschlag bildet die induzierte Aktivität; dass es sich um einen materiellen Körper handeln muss, geht daraus hervor, dass er in Säuren aufgelöst, oder mit Leder oder Filz abgerieben werden kann, und dass dieselben sogar nach völliger Einäscherung⁶⁶⁾ noch stark aktiv bleiben. Die Emanationsrestatome, aus denen der Niederschlag besteht, setzen den Prozess immer weiter fort, unter beständiger α -Strahlung, zuletzt auch unter β - und γ -Strahlung; dabei bleiben aber die Zerfallprodukte stets an den Wänden und Staubteilchen haften. Woher soll denn die relativ recht grosse Gasmenge des gebildeten Heliums herkommen? Es ist nicht einzusehen, dass das Helium hier als Endprodukt der ganzen Evolution auftrete, es ist höchstens denkbar, dass dasselbe als Nebenprodukt, neben den sukzessiven Umwandlungsstufen der induzierten Aktivität, entstehe.

Diese Ueberlegung führte *Rutherford*⁶⁷⁾ zu einer Hypothese, die unabweislich scheint: Das entstehende Helium ist nicht das Schlussresultat des Atomzerfalles radioaktiver Elemente, sondern eine beständig sekundär gebildete Substanz, das *Helium ist die Gesamtheit der α -Teilchen*, die bei fast jeder Umwandlung ausgestrahlt werden. In der Tat fand sich die Masse eines α -Teilchen (p. 23) der Grössenordnung nach etwas grösser, als diejenige eines Wasserstoffatoms; ob es sich dabei um eine zwei- oder vier- oder mehrfache Masse handelt, ist natürlich aus den schwierigen Messungen nicht festzustellen. Nun ist das Atomgewicht des Heliums 4, es ist also sehr wohl

möglich, dass die α -Teilchen kleine Atome von der vierfachen Masse des Wasserstoffatoms seien, somit Heliumatome.

Ist aber diese Hypothese richtig — und es besteht kein Grund, sie nicht anzunehmen — so spielt die Heliumbildung keine direkte Rolle im Verlauf der Atom-Umwandlung, es kann die letztere ganz selbständig betrachtet werden.

Die induzierte Aktivität kann nicht nur, wie dies schon öfters erwähnt wurde, dadurch erhalten werden, dass man den zu aktivierenden Körper (eventuell unter Aufladen auf ein hohes, negatives Potential) mit Emanation in Berührung bringt, sondern es gibt eine mehr chemische Abscheidungsmethode, die nach *Hofmann*⁵¹⁾ als *Ionen-Aktivierung* bezeichnet werden kann.

Löst man nämlich ein radioaktives Salz auf, so kann seine Aktivität auf folgende zwei Weisen auf einen andern Körper übertragen werden: Entweder löst man noch ein zweites, inaktives Salz in der gleichen Lösung auf und fällt das letztere durch irgend ein Reagenz aus, dabei wird fast immer der Niederschlag radioaktiv sein, während die zurückbleibende Lösung ihre Aktivität teilweise oder ganz eingebüsst hat; oder man taucht in die radioaktive Lösung ein geeignetes Metallblech, das in vielen Fällen auch wieder die Aktivität auf sich konzentriert. — Beispiele solcher Ionenaktivierung haben wir bereits erwähnt: die Darstellung *Becquerels* von U. X. (p. 30), die Gewinnung des Radiotellurs nach *Marckwald* (p. 37) u. s. w. *Hofmann*, *Gonder* und *Wölfl*⁵¹⁾ haben dieses Gebiet besonders eingehend bearbeitet und den Unterschied zwischen primär aktiven Substanzen, die zeitweilig ihrer Aktivität beraubt werden können, sich aber immer wieder regenerieren, und zwischen den sekundär aktiven Umwandlungsstufen, die mit der Zeit vollständig verklingen, deutlich nachgewiesen. Aus ihren Versuchen geht auch hervor, dass im Gegensatz zur gewöhnlichen Erscheinung der induzierten Aktivität, die sich ohne Unterschied an allen Körpern niederschlägt, die Ionenaktivität selektiv auftritt, sich an gewisse Substanzen mit Vorliebe anheftet, an andere gar nicht. Dadurch ist aber ein wertvolles Mittel an die Hand gegeben, die verschiedenen Aktivitäten zu trennen und deren Natur einzeln zu studieren.

Noch besser gelingt dies auf *elektrolytischem* Wege; es ist besonders das Verdienst von *v. Lerch*, a. 1903 auf diese

Methode hingewiesen zu haben. Durch Elektrolyse einer radioaktiven Lösung werden je nach Umständen gewisse Aktivitäten an den Elektroden abgeschieden und von den andern isoliert.

Auch *Temperaturänderungen* beeinflussen die verschiedenen Zerfallprodukte der Radioaktivität in verschiedenartigster Weise. *Miss Gates* zeigte a. 1903, dass ein induziert aktiver Draht bei starker Erhitzung sein Strahlungsvermögen grösstenteils verliert; seine Aktivität ist aber nicht vernichtet, sondern nur verflüchtigt. Umgibt man nämlich einen solchen Draht mit einem Hohlzylinder und bringt den Draht durch elektrischen Strom zum Glühen, so destilliert die induzierte Aktivität auf die Innenwände des Zylindermantels über, und derselbe gibt nun die Elektronenstrahlung aus, die von dem Drahte entschwunden ist. Je nach dem Erwärmungsgrad destillieren verschiedene Umwandlungsstufen der induzierten Aktivität über, so dass hier ein brauchbarer Weg zu deren Trennung vorliegt.

Stets bleiben die Reaktionen zum Nachweis der induzierten Aktivität ihre Elektronenstrahlung, meistens α -Strahlen, oft auch kräftige β - und γ -Strahlen. Jeder induziert aktive Körper kann ein intensives Scintillieren auf Sidot-Blende erzeugen, seine photographischen Wirkungen sind schon nach kurzer Expositionsdauer beobachtbar (wie aus der beigelegten Tafel, Fig. 4, deutlich ersichtlich ist), die sicherste, auch quantitativ brauchbare Methode ist natürlich die Messung der von ihm erzeugten Ionisierung.

Alle derartigen Beobachtungen ergeben, dass die induzierte Aktivität, welches auch ihre Erzeugungsweise und spätere Behandlung gewesen sei, in regelmässiger Weise mit der Zeit verschwindet, und dass auch hier dasselbe einfache Gesetz gilt, das bei der Abklingung der Emanation erwähnt wurde.

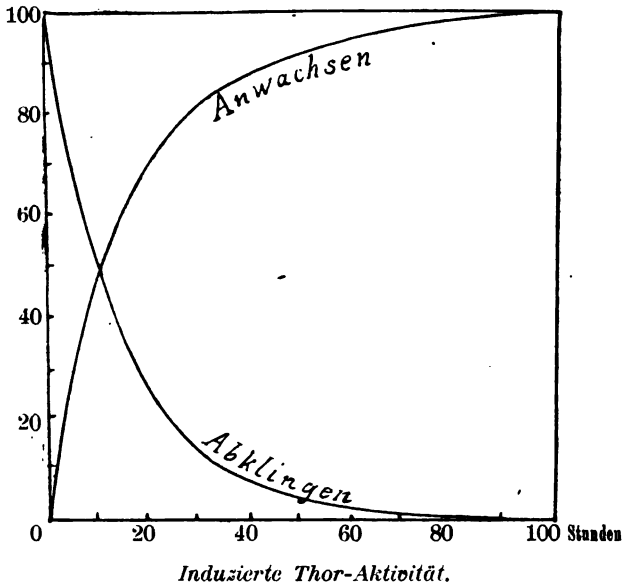
Ist J^0 die anfängliche, induzierte Aktivität, so ist sie nach der Zeit t zu einem Werte J abgeklungen, so dass $J = J^0 \cdot e^{-\lambda t}$.

Auch hier ist λ die charakteristische *Abklingungskonstante*, die zweckmässig durch Angabe der *Halbierungskonstanten* ($H. C$) ersetzt werden kann.

Freilich sind die Verhältnisse infolge der vielen aufeinanderfolgenden Aktivitätsstufen wesentlich komplizierter; es soll im folgenden gezeigt werden, wie sich dieselben bei dem Thorium und Radium entwirren lassen.

B. Induzierte Aktivität des Thoriums.

Schon die ersten Messungen *Rutherfords* haben dargetan, dass ein der Thor-Emanation während einigen Tagen ausgesetzter Körper induzierte Aktivität bis zu einem Sättigungsgrade aufnimmt. Von der Emanation getrennt beginnt die Abnahme jener Aktivität mit einer Abklingungskonstanten $\lambda = 0,0000175$ Sek.⁻¹, resp. mit einer Halbierungskonstanten von fast genau 11 Stunden.



Diese Zahl findet sich nicht nur bei Beobachtung der Abklingung der induzierten Aktivität, sondern ebensogut bei der *allmählichen Bildung* derselben. Wird nämlich der inaktive Gegenstand zur Zeit $t = 0$ in die Emanation gelegt, und beobachtet man zu verschiedenen Zeitmomenten t seine induzierte Aktivität J , so wächst dieselbe genau nach dem umgekehrten Gesetze ihrer Abklingung an: ist J_{∞} die Schlussaktivität, die den Sättigungszustand nach längerer Zeit (theoretisch für $t = \infty$) darstellt, so wird

$$J = J_{\infty} (1 - e^{-\lambda t}).$$

Doch dieses einfache Verhalten, das durch zahlreiche Messungen bestätigt ist, wird leicht komplizierter. Lässt man den

inaktiven Gegenstand nur kurze Zeit mit der Emanation in Berührung, so dass er sich nicht mit induzierter Aktivität sättigen kann, so zeigt dieselbe nach Herausnahme aus der Emanation zunächst ein langsames Wachstum, und erst nach einiger Zeit tritt die normale Abklingung ein, die in je 11 Stunden auf den halben Wert sinkt. So beobachtete *Miss Broocks*⁷¹⁾ bei einem Körper, der 10 Minuten lang in Thorium-Emanation weilte (bei einer Ladung auf -100 Volt) zuerst eine Zunahme der α -Strahlung während den ersten 3,7 Stunden, die bis zum fünffachen des Anfangswertes anwuchs und dann erst in bekannter Weise abfiel.

Die mathematische Darstellung dieses Vorganges verlangt eine Summe von 2 Exponentialfunktionen mit verschiedenen Abklingungskonstanten:

$$J = J^0 (A \cdot e^{-\lambda_1 t} + B \cdot e^{-\lambda_2 t}).$$

Dies bedeutet aber, dass hier 2 Aktivitäten auftreten, mit verschiedenen Konstanten, deren Zahlwerte sich ergeben:

$$\begin{array}{ll} \lambda_1 = 0,0000175 \text{ Sek.}^{-1} & \text{H. C.} = 11 \text{ Stunden.} \\ \lambda_2 = 0,000208 \text{ Sek.}^{-1} & \text{H. C.} = 55 \text{ Minuten.} \end{array}$$

Wie schon früher erwähnt, ist deshalb anzunehmen, dass die *Thor-Emanation* bei Bildung der induzierten Aktivität sukzessive durch 2 Umwandlungsstufen hindurch geht: *Thor A* und *Thor B*, die sich durch die obigen Konstanten charakterisieren lassen.

Ein genaueres Eingehen auf die Messungen dieser Aktivität veranlasste *Rutherford* zu der Annahme, dass der erste dieser Umwandlungsprozesse, der Zerfall des Thors A in Thor B, *ohne jegliche Elektronenstrahlung* stattfinde (ein sog. rayless change), während die Umwandlung des Thors B in das inaktive Endprodukt von einer kräftigen α -, β - und γ -Strahlung begleitet ist. Die Frage, die durch Abklingungsversuche nicht beantwortet wird, ist diejenige, ob das Thor A in 55 Minuten um die Hälfte verschwindet, und das Thor B in 11 Stunden — oder umgekehrt. Wie man auch die Beobachtung anstellen mag, stets ist nach einiger Zeit der definitive Zerfall durch die H. C. von 11 Stunden bezeichnet. Dies beweist aber keineswegs, dass diese langsame Umwandlung der letzte Prozess sei; sie könnte ebensogut dem Thor A als dem Thor B zukommen.

Wenn nämlich das erste Produkt, das Thor A, in der kurzen Zeit (55 Minuten) abklingt, so liefert es natürlich schon nach wenigen Stunden das Thor B in maximaler Menge; da aber nur das Thor B Strahlen aussendet, so sinkt selbstverständlich die Aktivität des induzierten Körpers langsam ab, mit der H. C. von 11 Stunden. Ist dagegen das Thor A die langsam abklingende Stufe, so erzeugt dieselbe — wiederum ohne Strahlung — allmählich das Thor B. Dieses zerfällt sehr rasch und liefert dabei die gesamte, überhaupt beobachtbare Aktivität. Da aber die Menge des Thor B nur in dem Masse entsteht, als das Thor A sich umwandelt, so ist der Gehalt an Thor B immer proportional dem Gehalt an Thor A. — Die ausgesandte Strahlung, obgleich von Thor B herrührend, ist also stets proportional der noch vorhandenen Menge Thor A und klingt deshalb wie dieses in 11 Stunden auf die Hälfte ab.

Es müssen somit andere Versuche angestellt werden, um das Thor A von dem Thor B unterscheiden zu können. Diese Versuche müssen dahin zielen, beide Substanzen zu isolieren. Gelingt es auch dann, auf die Dauer nur eine Abklingung von 11 Stunden zu finden, so ist offenbar das Thor A das rasch zerfallende Produkt; denn auch, wenn man es isoliert, geht es in einigen Stunden in Thor B über. Gelingt es aber, Präparate zu finden, die in kurzer Zeit abklingen, so ist das Thor B der rasch verklingende Körper, der in solchen Präparaten in mehr oder weniger reinem Zustande auftritt.

Auf rein chemischem Wege ist diese Trennung nicht direkt ausführbar. Wohl hat *Rutherford* gezeigt, dass man die induzierte Aktivität von dem Körper, an welchem sie sich niedergeschlagen hatte, ablösen kann; z. B. durch Eintauchen in Salzsäure oder Schwefelsäure, ebenso auch durch Abreiben mit Sandpapier. Aber die dermassen losgelöste Aktivität enthält immer das Thor A und das Thor B und zeigt die gewohnte Abklingung.

Erst durch die Versuche von *Pegram*, von *v. Lerch*⁶⁸⁾, von *Miss Slater*⁶⁹⁾ haben sich die zwei Aktivitäten trennen lassen, wodurch deutlich wurde, dass das *Thor A* das langsam abklingende Produkt sei, während das *Thor B* rasch zerfällt. Die Versuche von *v. Lerch* beruhen durchwegs auf Ionenaktivierung. Ein induziert aktiver Kupferdraht wurde in Sal-

petersäure gelöst; fällt man das Cu mit Kalilauge aus, so ist der Niederschlag aktiv; oder ein induzierter Platindraht wird in Salzsäure getaucht; die Aktivität wird aufgelöst und kann zugleich mit Bariumsalzen ausgefällt werden. Eine Trennung der 2 Aktivitäten war vorerst nur auf elektrolytischem Wege möglich: Eine salzsaure Lösung von Thor-Aktivität (von induziertem Pt. abgelöst) wurde der Elektrolyse unterworfen; je nach den angewandten Kathoden lagern sich auf derselben Thor A und Thor B in verschiedener Menge ab, so dass das Gemisch weder die H. C. von 11 Stunden, noch diejenige von 55 Minuten zeigt, sondern Zwischenwerte von etwa vier bis fünf Stunden. Später liess sich Thor A und Thor B auch rein chemisch trennen, in ähnlicher Weise wie *Marckwald* das Radiotellur gewonnen hat. Taucht man bestimmte Metalle in Lösungen von Thor-Aktivität, so scheidet sich dieselbe darauf ab und zwar selektiv: Pt und Pd bleiben inaktiv, Cu, Sn, Sb, Ni, Fe, Cd, Zn, Mg, Al werden aktiv. Verwendet man Zn, so nimmt dasselbe Thor A auf, die Abklingung geht in 11 Stunden auf die Hälfte. Taucht man dagegen Ni in die Aktivitätslösung, so ergibt sich eine H. C. von ungefähr einer Stunde, d. h. fast genau die H. C. = 55 Minuten des Thors B. Nicht nur wurde dadurch bewiesen, dass das Thor B selbständig, als rasch zerfallendes Produkt existieren kann, sondern *v. Lerch* zeigte auch weiter, dass die aus der Lösung abgeschiedene Menge des Thors B stets proportional sei der vorhandenen Menge des Thors A, dass somit wirklich das Thor B durch Umwandlung aus Thor A entsteht — eine neue Stütze für die Theorie des Atomzerfalles.

Miss Slater beobachtete u. a. eine Trennung des Thors A von dem Thor B unter dem Einfluss der Kathodenstrahlen, stellte aber besonders fest, dass die beiden Produkte durch Erhitzung geschieden werden können. Nach ihren Versuchen beginnt die Thor-Aktivität eines induzierten Drahtes bei dunkler Rotglut sich zu verflüchtigen; eine Erhitzung auf 1200° C. während 3 Minuten soll genügen, um alle Aktivität wegzutreiben. Im zwischenliegenden Temperaturintervall verhalten sich die beiden Aktivitäten verschieden. Das Thor A ist bedeutend flüchtiger; seine Abdestillierung beginnt bei dunkler Rotglut, während Thor B erst bei 700° zu verdampfen anfängt.

So ist es möglich, durch passendes Erhitzen (während 6 Minuten auf 1050°) alles Thor A wegzujagen, so dass noch ein Ueberrest reinen Thors B übrigbleibt, der in ungefähr einer Stunde auf die Hälfte abklingt.

C. Induzierte Aktivität des Radiums.

Wesentlich komplizierter als bei dem Thorium sind die Erscheinungen der induzierten Aktivität bei dem Radium. Aber der Gedankengang, der bei ersterem zur Klärung der Situation führte, ist auch hier derselbe.

Selbstverständlich sind die Wirkungen der induzierten Radiumaktivität (wie alle Radium-Erscheinungen) ausserordentlich kräftiger, als bei Thorium; ihr Studium ist aber dadurch erschwert, dass sie in weitaus kürzerer Zeit abklingen.

Schon die ersten Beobachtungen von *Curie* und *Danne* ergaben, dass eine einfache Exponentialfunktion zur Darstellung der wirklichen Abklingung nicht ausreiche. Die detaillierten Resultate ihrer Messungen sind bedauerlicherweise nie publiziert worden, dagegen haben sie eine klassisch gewordene Figur für den Abfall der induzierten Aktivität gegeben. Die Expositionsdauern variieren daselbst von 10 Sek. zu 1, 5, 20, 40 Minuten, 24 Stunden, 6 Tagen; die dazu gehörige Abklingung ändert sich ganz bedeutend. Für längere Expositionsdauern stellen⁷⁰⁾ sie eine ebenfalls klassische Formel auf:

$$J = J_0 \left(a \cdot e^{-\frac{t}{\Theta_1}} - (a - 1) \cdot e^{-\frac{t}{\Theta_2}} \right); a = 4,20; \Theta = 2420 \text{ sek.}^{-1}; \\ \Theta_2 = 1860 \text{ sek.}^{-1}.$$

Die daraus abgeleiteten H. C. berechnen sich zu 21 Minuten und zu 28 Minuten. Nach einigen Stunden ist die eine der Exponentialfunktionen schon äusserst klein geworden; die induzierte Aktivität fällt dann in normaler Weise ab, *in je 28 Minuten um die Hälfte abnehmend*. Das ist die eigentliche, typische Zeitkonstante, an welcher je und je die Existenz verborgener Radiummengen durch ihre Aktivität mit Sicherheit erkannt wurde.

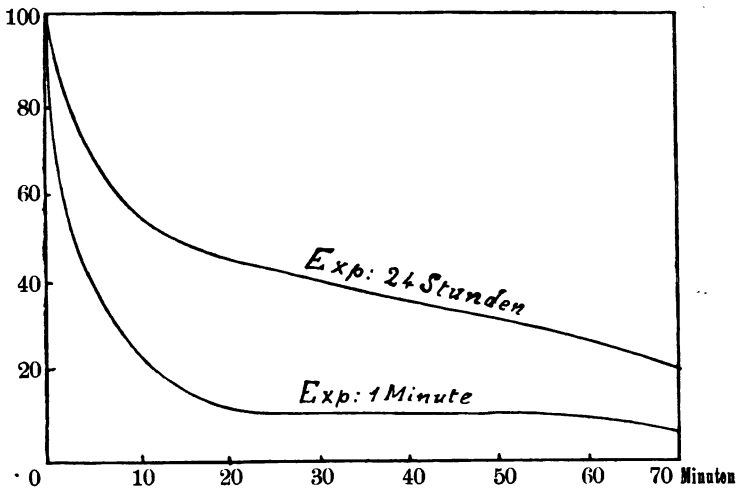
Rutherford und *Miss Brooks*⁷¹⁾ sind diesem Problem etwas näher getreten. Ihre Resultate stimmen nicht immer mit den Beobachtungen *Curie's* überein. Der Hauptgrund mag

darin liegen, dass bei den Messungen des letzteren sowohl α - als auch β - und γ -Strahlung mitwirken, während in den neuern Untersuchungen diese Strahlenarten sorgfältig auseinandergelassen werden. Ferner aber hat sich ergeben, dass neben den beiden Umwandlungsstufen, welche von *Curie* und *Danne* beobachtet wurden, noch eine dritte auftritt, die allerdings ausnehmend rasch verklingt (in etwa 3 Minuten sinkt sie auf $\frac{1}{2}$ Wert), die aber doch nicht ganz vernachlässigt werden kann.

Nach allgemeiner Uebereinstimmung geht die Radium-Emanation durch 3 Umwandlungsstufen in ein provisorisches Endprodukt über, wobei die zweite Umwandlung keine oder höchstens eine ganz minimale α -Strahlung aufweist. Unter Benützung der neueren Zahlen von *Duane*⁷²⁾ ergibt sich folgende Zusammenstellung:

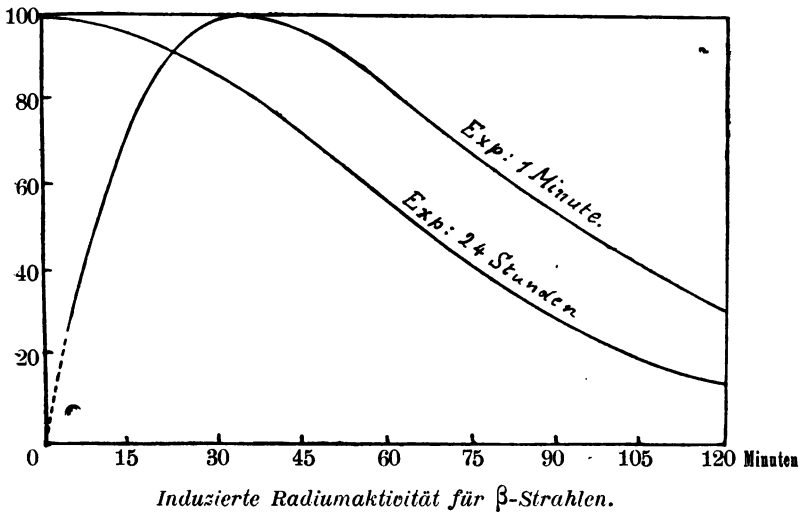
	λ	H. C.	Strahlen
Radium A	0,00401 Sek. ⁻¹	2,9 Min.	α -Strahlen
Radium B	0,000538 Sek. ⁻¹	21 Min.	Keine Strahlen
Radium C	0,000413 Sek. ⁻¹	28 Min.	α -, β -, γ -Strahlen

Mit diesen Angaben lässt sich eine ziemlich befriedigende Erklärung der Beobachtungen an induzierter Radiumaktivität geben. Nach *Rutherford* ist der typische Verlauf der Erscheinungen etwa folgender:



Induzierte Radiumaktivität für α -Strahlen.

Misst man die α -Strahlung eines Körpers, der nur 1 Minute lang der Radium-Emanation ausgesetzt war, so sinkt die Strahlungsintensität in den ersten 15—20 Minuten sehr rasch bis zu etwa 10% des ursprünglichen Wertes herunter, während der nachfolgenden 30 Minuten bleibt die Aktivität nahezu konstant, dann tritt der normale Abfall ein, mit der H. C. von 28 Minuten. War der Körper etwa 24 Stunden lang mit Emanation in Berührung und misst man die α -Strahlung, so tritt auch hier anfänglich während ungefähr 10 Minuten ein rascher Abfall ein, der aber nur auf ca. 50% des Anfangswertes heruntergeht; dann findet eine Periode langsamen Sinkens statt, und nach etwa 4 Stunden tritt der normale Abfall ein, mit der H. C. von 28 Minuten.



Wesentlich anders verhält sich die β -Strahlung: dieselbe soll ja nur entstehen bei dem Zerfall des dritten Umwandlungsproduktes, des Radiums C; sie kann deshalb erst einsetzen, wenn die beiden Umwandlungen von A in B und B in C begonnen haben. Dauerte die Exposition nur 1 Minute, so ist bei der Herausnahme des Körpers aus der Emanation noch keine merkliche β -Aktivität vorhanden. Dieselbe wächst jedoch ziemlich rasch an und erreicht nach ungefähr 36 Minuten ihr Maximum. Jetzt beginnt der Abfall, der nach einigen Stunden in normaler Weise mit der H. C. von 28 Minuten erfolgt.

Wurde aber der Körper 24 Stunden lang der Emanation ausgesetzt, so ist natürlich das Radium C bereits in gesättigtem Zustande angehäuft. Der Abfall der β -Strahlung beginnt deshalb sofort, aber weitaus langsamer wie derjenige der α -Strahlung; erst nach längerer Zeit tritt wieder die normale Abklingung auf. Messungen über die γ -Strahlen allein bestätigen die Erwartung, dass die γ -Strahlung der β -Strahlung proportional sei und wie dieselbe abklinge.

Das Auffinden der Zahlwerte für die 3 Abklingungskonstanten geschieht auf theoretischem Wege; auch die Annahme, dass die Umwandlung des Radiums B in Radium C ohne Strahlung (rayless change) erfolge, ist rein theoretisch abgeleitet. Die Bestimmung der Reihenfolge der drei Stufen, d. h. die Festsetzung, welche Abklingungskonstanten denselben zukommen, kann bei dem Radium wie bei dem Thorium nur durch Isolierung der einzelnen Produkte ausgeführt werden. Wegen des raschen Abklingens sind die chemischen und elektrolytischen Methoden nicht erfolgreich anzuwenden; freilich ist die induzierte Aktivität durch Säuren ablösbar und kann auch mechanisch von dem induzierten Körper abgerieben werden, aber eine Trennung der einzelnen Stufen erfolgt dadurch nicht in merklicher Weise.

Die erste Aktivitätsstufe, Radium A, die nur einige Minuten lang spürbare Wirkungen erzeugt, ist wohl nie isoliert worden. Ihre Existenz offenbart sich nur aus dem enorm raschen Abfall der α -Strahlung; da derselbe immer anfangs eintritt, so ist bestimmt anzunehmen, dass das *Radium A* mit der *H. C. von ca. 3 Minuten* das erste Umwandlungsprodukt sei. Die Trennung von Radium B und Radium C ist durch *Curie* und *Danne*⁷³⁾ erzielt worden. Die aktivierten Metalle wurden verschiedenen Temperaturerhöhungen von 15°—1400°C. unterworfen. Bei 15° war die Abklingung eine normale, gemäss der Formel p. 65 mit 2 Exponentialausdrücken. Mit steigender Temperatur, bei 215° und 540°, nahm der Einfluss der einen Exponentialfunktion ab, und bei 630° erfolgte, sofort nach der Erhitzung, der Abfall gemäss der andern Exponentialfunktion allein, und zwar derjenigen von der *H. C.* 28 Minuten. Es hat sich also bei 630° die eine Radiumstufe vollständig verflüchtigt, und es ist nur noch eine übrig geblieben, die sich in 28 Minuten um die Hälfte in ein inaktives Produkt umbildet. Demgemäss könnte

die *H. C. von 28 Minuten* dem *Radium C* zukommen, und es bleibt für das *Radium B* die *H. C. von 21 Minuten*. Das *Radium B* wäre somit ein leicht destillierbarer Körper, der bei 630° total verflüchtigt, der aber vielleicht schon bei Zimmertemperatur etwas verdampft.

Die Versuche von *Curie* und *Danne* sind jedoch nicht so einfach zu deuten. Sie zeigen Beobachtungsergebnisse, deren Tragweite nicht unterschätzt werden darf. Ist bei 630° auf dem Metalle nur noch *Radium C* vorhanden, so sollte dasselbe unter allen Umständen die *H. C. 28 Minuten* beibehalten. Dies traf nicht zu: bei weiterer Erhitzung bis gegen 1100° C. nimmt der Wert der *H. C.* ab, bei noch höherer Temperatur (bis 1300° C.) wächst sie wieder. Dasselbe war auch bei zweimaliger Destillation der Fall. Der aktivierte Draht wurde zuerst über 600° erhitzt, so dass alle Aktivität *B* entfernt sein sollte; dann wurde er in einen Hohlzylinder gespannt und nochmals intensiv geglüht, so dass ein Teil der Aktivität *C* überdestillierte und sich im Innern des Zylindermantels absetzte. Aber die Abklingung dieses Destillates war auch wieder variabel, von der Temperatur abhängig.

Es ist unzweifelhaft, dass eine definitive Bestätigung dieser Beobachtung, d. h. die Feststellung einer Beeinflussung der Abklingungskonstanten durch Temperaturänderung, einen sehr bedenklichen Einwand gegen die Theorie des Atomzerfalles bedeuten würde; denn gerade die absolute Konstanz der Abklingungskonstanten war ein Hauptmotiv p. 57, die Erscheinungen der Radioaktivität auf Vorgänge innerhalb des Atomes zurückzuführen. In neuester Zeit glaubt *Makower*⁷⁴⁾ einen Einfluss hoher Temperaturen (1000 — 1200°) auf die β -Strahlung zu finden, indem er eine Veränderung der ionisierenden Wirkung einer mit Emanation und induzierter Aktivität gefüllten Quarzröhre infolge Erhitzung beobachtete.

Demgegenüber stellen sich *W. Schmidt*⁷⁵⁾ und *Bronson*⁷⁶⁾ auf einen ganz andern Standpunkt, der allerdings die vorigen Ausführungen wesentlich modifiziert. Beide Beobachter finden nämlich übereinstimmend, dass die scheinbare Veränderung der Abklingungskonstanten durch Erhitzung erklärt wird, wenn man die Reihenfolge der zwei letzten Radiumprodukte vertauscht. Wenn nach *Schmidt* das *Radium B* bei seiner

strahlungslosen Umwandlung in *28 Minuten* auf die Hälfte abklingt, dagegen das *Radium C* in *21 Minuten*, wobei immer noch das Radium B als der leicht flüchtige Bestandteil anzusehen ist, so fallen jene Anomalien weg. Dass die Radiumaktivität trotzdem zuletzt immer die H. C. 28 Minuten aufweist, ist dann in ganz ähnlicher Weise wie bei dem Thorium (p. 63) zu verstehen. *Bronson* geht noch weiter und findet überhaupt andere Zahlwerte. Er betont, dass der klassische Wert von 28 Minuten aus Beobachtungen hergeleitet wurde, die sich nur über 1—2 Stunden erstrecken, während aus längeren Beobachtungszeiten die 5—6 Stunden nach Herausnahme des induzierten Körpers aus der Emanation fortgesetzt werden, sich eine H. C. von *26 Minuten* für *Radium B* ergebe. Bei genügender Abdestillierung des Radiums B bleibt dann ein Rückstand, dessen H. C. nur *19 Minuten* beträgt; dies wäre das Radium C.

Diese kurzen Erörterungen zeigen, wie sehr es noch exakter und feiner Messungen bedarf, um zuverlässige Resultate in diesen wichtigen Fragen zu erhalten. Dass es noch andere Anomalien gibt, soll nur beiläufig erwähnt werden; schon *Curie* beobachtete, dass gewisse induziert aktive Körper, wie Kautschuk, Paraffin, Celluloid etc. viel langsamer abklingen; wahrscheinlich absorbieren sie Emanation und zeigen deshalb deren langsam verschwindenden Abfall. *Schmidt* gibt ferner an, dass auch bei dem Umwandlungsprozess des Radiums B in Radium C, der strahlungslos sein soll, doch noch Spuren von β -Strahlen beobachtbar seien.

Dass die Umwandlungsreihe des Radiums mit dem Radium C nicht zu Ende kommt, ist nach früherem bekannt. Es folgen auf dasselbe die drei langsamen Umwandlungsprodukte: *Radium D*, das in etwa *40 Jahren* in strahlungsloser Umwandlung um die Hälfte verschwindet, dann *Radium E*, das unter blosser β -Strahlung in *sechs Tagen* seine halbe Aktivität verliert, und *Radium F*, dessen H. C. zu *143 Tagen* berechnet wurde, und das unter blosser α -Strahlung das definitive Schlussprodukt der Radiumtransformation gibt.

Nur kurz soll hier bemerkt werden, wie diese Umwandlungsprodukte unterschieden werden können. *Rutherford* erhitzte ein seit zwei Monaten aktiviertes Platinblech während acht Minuten auf etwa 1050° C. Dies genügte, um ein fast

vollständiges Verschwinden aller α -Strahlen zu erzeugen, während die β -Strahlung ziemlich gleich blieb. Jedenfalls war also das α -strahlende Produkt, Radium F, bei 1000° verflüchtigt; dass das Radium E allein geblieben war, zeigte sich an der H. C. der vorhandenen β -Strahlung, die zwar nicht sechs Tage, wohl aber 4,5 Tage betrug (also nur approximativ richtig). Dass auf jenem Blech das Radium D durch Erhitzen auf 1000° auch fast völlig verflüchtigt wurde, ergibt sich daraus, dass kein neues Radium E in merklicher Menge entstand. Durch Auflösen in Säuren sind die drei Aktivitäten nicht trennbar. *Rutherford* hatte die Emanation von 30 mgr reinen RaBr_2 in einer Glasröhre aufgefangen und dieselbe zugeschmolzen. Nach einem Monat, als sich an den Wänden ein Quantum Radium D, E und F niedergeschlagen hatte, wurde die Röhre abgebrochen und mit verdünnter Schwefelsäure ausgewaschen. Alle drei Aktivitäten gingen in Lösung über; hingegen war das Radium F leicht zu isolieren, da es eine besondere Affinität für Wismuth besitzt. Durch Eintauchen eines Wismuthbleches ward Radium F abgeschieden und zeigte deutlich seine reine α -Strahlung (wohl vermischt mit «langsamen β -Strahlen») und seine H. C. von ca. 143 Tagen. Auch aus älteren Radiumpräparaten konnte Radium D, E und F gewonnen und untersucht werden. Das Radium D, das ja keine Strahlen aussenden soll, entgeht natürlich jeder Untersuchung; seine Abklingungskonstante konnte deshalb nur theoretisch, und zwar ganz angenähert berechnet werden. Die Beobachtungen *Meyers* und *v. Schweidler's*⁵⁸⁾ haben jene Messungsergebnisse bestätigt.

Nur der Vollständigkeit halber sei hier bemerkt, dass auch für das *Aktinium* der Nachweis geliefert wurde durch *Debierne, Godlewski*⁵⁸⁾, *Meyer* und *v. Schweidler*⁵⁸⁾, dass seine induzierte Aktivität aus zwei Stufen besteht: Akt. A mit der H. C. von 36 Minuten, das sich ohne Elektronenstrahlung in Akt. B mit der H. C. von 1,5 Minuten umwandelt. Beide Aktivitäten sind elektrolytisch trennbar; bei heller Rotglut wird fast alles Akt. A verflüchtigt, und es bleibt nahezu reines Akt. B zurück.



VI. Numerische Angaben.

Rutherford hat versucht, aus den verschiedenartigen Beobachtungen über Radioaktivität jeweiligen numerische Resultate für seine hypothetischen Anschauungen herzuleiten. So gewagt diese Berechnungen oft sein mögen, so geben sie doch interessante Einblicke in die Natur der Erscheinungen, und es ist wohl der Mühe wert, diese etwas zerstreut vorkommenden Zahlen hier in übersichtlicher, einheitlicher Weise zusammenzustellen. — Dabei differieren die nachfolgenden Angaben oft wesentlich von denjenigen *Rutherfords*, weil sie in selbständiger Weise, mit Zugrundelegung geeignet scheinender Daten, ausgerechnet wurden. Diese Differenzen fallen jedoch kaum in Betracht, wenn man bedenkt, dass es eigentlich nur auf die *Größenordnung* der Zahlwerte ankommt, und dass deshalb die Berechnungen überhaupt nur in roher Annäherung ausgeführt sind.

Als numerische Daten nehmen wir für Wasserstoff an, bei Normaldruck und Normaltemperatur:

Dichte des H: 0,000090 bezogen auf Wasser = 1

Volumen von 1 gr H: 11100 cm³

Zahl der Moleküle in 1 cm³ H: $N = 4,0 \cdot 10^{19}$

(Loschmidt's Zahl).

Spez. Ladung eines Atomes H: $e/m = 9600$ el. magn. Einheiten.

Daraus ergibt sich sofort (immer in runden Zahlen):

Zahl der Atome in 1 cm³ H: $8,0 \cdot 10^{19}$

Gewicht eines Atomes H: $1,12 \cdot 10^{-24}$ gr.

Ladung eines Elektrons: $e = 9600 \cdot 1,12 \cdot 10^{-24} = 1,07 \cdot 10^{-20}$

el. magn. Einheiten = $3,2 \cdot 10^{-10}$ el. stat. Einheiten.

Angewandt auf *Radium* (Atomgewicht = 223,3 für H = 1) folgt:

Gewicht eines Atomes Ra: $250 \cdot 10^{-24}$ gr.

Zahl der Atome in 1 gr Ra: $4 \cdot 10^{21}$.

Wird Radium verdampft und bildet dasselbe ein einatomiges Gas, so folgt nach Avogadro's Gesetz:

Zahl der Atome Ra in 1 cm³ Gas: $4,0 \cdot 10^{19}$.

Volumen von 1. gr Ra in Form eines einatomigen Gases: 100 cm³.

Bei den nachfolgenden Ausrechnungen für Radiumpräparate ist zu beachten, dass es sich meist um RaBr_2 handelt; da $\text{Ra} = 225$, $\text{Br} = 80$, so ist der Radiumgehalt desselben jeweilen $58,4\%$.

Von besonderem Interesse sind zunächst die Berechnungen der ausgestrahlten Teilchen.

Die *Zahl* derselben lässt sich am einfachsten finden, wenn man die pos. oder neg. Ladung misst, welche die α - resp. die β -Teilchen mit sich führen. Natürlich bleibt dabei als grosser, unbekannter Faktor die Absorption, welche die betreffenden Strahlen im radioaktiven Körper selber und in der Umgebung erleiden; endlich ist die Frage nach der absoluten Reinheit der verwendeten Präparate immer noch eine offene.

Die ersten Angaben für die mit den β -Teilchen ausgegebene, negative Ladung finden sich in Versuchen von *W. Wien*²⁷⁾.

Er findet, dass 4 mgr RaBr_2 , also 2,33 mgr Ra, durch ihre negative Ausstrahlung einen Strom von $2,91 \cdot 10^{-12}$ Amp. erzeugen, d. h. in 1 Sekunde $2,91 \cdot 10^{13}$ el. mag. Elektrizitätsmengen-Einheiten mitführen. Da $e = 1,07 \cdot 10^{-20}$ die Ladung eines β -Teilchens ist, so wird obige Menge von $2,72 \cdot 10^7$ Teilchen weggeführt. Dies ist die Anzahl der von 2,33 mgr in einer Sekunde ausgestrahlten β -Teilchen. Somit würde 1 gr Ra in einer Sekunde $11,6 \cdot 10^9$ β -Teilchen ausstrahlen. Bedenkt man, dass die β -Teilchen zum Teil absorbiert werden, so gibt diese Zahl einen Minimalwert an. Nach neuesten Messungen findet *Rutherford*²⁷⁾ $7,3 \cdot 10^{10}$ β -Teilchen.

Die Bestimmung der Zahl der α -Teilchen ist jedenfalls noch schwieriger. In seinen neueren Versuchen hat *Rutherford*²⁷⁾ eine sehr dünne Schicht entemaniierten Radiums auf ein Platte aufgetragen, die «langsamen β -Strahlen» abgelenkt und dann die positive Ladung einer gegenüberliegenden Platte gemessen. Er findet, dass 0,484 mgr RaBr_2 in einer Sekunde $17,6 \cdot 10^6$ α -Teilchen ausgaben, somit 1 gr Radium $6,2 \cdot 10^{10}$. Dabei ist das Radium entemaniiert, also im Zustande seiner Minimalaktivität; es liefert also (p. 33) nur 25% der gesamten α -Strahlung, die es im Gleichgewichtszustand (sog. konstante Aktivität) ausstrahlt. Demgemäss würde ein konstant aktives Radium-

präparat pro 1 gr Radium in einer Sekunde $2,5 \cdot 10^{11}$ α -Teilchen ausschleudern.

Bei der Unsicherheit dieser Zahlen (die ja leicht einige hundertmal grösser oder kleiner ausfallen könnten) ist nicht mit Bestimmtheit zu schliessen, ob die Zahl der ausgesandten β -Teilchen kleiner sei als diejenige der α -Teilchen. Immerhin sprechen die Zahlen eher für ersteres. Nach *Rutherford's* Hypothese ist dieses Verhältnis sogar ein bestimmtes: Das primäre Radium geht über in Emanation, dann in Radium A, Radium B, Radium C, zuletzt in das nahezu inaktive Radium D. Bei diesen fünf Umwandlungen ist die eine strahlungslos, die vier andern sind stets von α -Strahlung begleitet, nur die letzte gibt β -Strahlen. Im einfachsten Falle würde also bei jedem Prozess auf vier α -Teilchen immer ein β -Teilchen kommen. Ein konstant aktives Radiumpräparat müsste demnach viermal mehr α -Teilchen als β -Teilchen liefern; das ist die *Rutherford's*che Hypothese, die mit den obigen Zahlen recht gut übereinstimmt. Als Mittelwerte dürfen wir annehmen: *1 gr Radium sendet in einer Sekunde $0,62 \cdot 10^{11}$ β -Teilchen aus, 1 gr Radium sendet in einer Sekunde $2,5 \cdot 10^{11}$ α -Teilchen aus.*

Hieraus ergibt sich die Berechnung der *Energie* der α - und der β -Strahlung.

Natürlich ist auch hier ein weiter Raum für Zahlwerte zur Verfügung, um so mehr, als ja die α - und die β -Strahlen nicht homogen sind. Es scheint deshalb zweckmässig, von vorneherein solche Zahlen zu wählen, die zu einem richtigen Schlussresultat führen. Ebenfalls soll schon jetzt die Hypothese benützt werden, wonach die α -Teilchen nichts anderes sind als Heliumatome, also eine Masse von $4 \times 1,12 \cdot 10^{-24} = 4,5 \cdot 10^{-24}$ gr haben; freilich ist diese Zahl ziemlich grösser als die aus den Beobachtungen sich ergebende (p. 23), und es muss dann auch ein entsprechend kleinerer Wert für die Geschwindigkeit der α -Strahlen gewählt werden. Wir setzen:

$$\text{Für } \alpha\text{-Teilchen: } v = 1,6 \cdot 10^9 \frac{\text{cm}}{\text{sek.}} \quad m = 4,5 \cdot 10^{-24} \text{ gr.}$$

$$\text{Für } \beta\text{-Teilchen: } v = 2,0 \cdot 10^{10} \frac{\text{cm}}{\text{sek.}} \quad m = 0,7 \cdot 10^{-27} \text{ gr.}$$

Daraus ergibt sich die Energie je eines Teilchens $= \frac{mv^2}{2}$,
für α -Teilchen: $5,8 \cdot 10^{-6}$ erg, für β -Teilchen: $0,012 \cdot 10^{-6}$ erg.

Durch Multiplikation mit der Anzahl von Teilchen folgt:
Ein gr Radium strahlt in einer Sekunde an Energie aus:
 mit den α -Teilchen: $14,5 \cdot 10^5 \text{ erg} = 0,035 \text{ gr Cal}$,
 mit den β -Teilchen: $0,007 \cdot 10^5 \text{ erg} = 0,00017 \text{ gr Cal}$.

Es bestätigt dies die frühere Behauptung (p. 21), wonach fast die ganze Energieproduktion auf Rechnung der α -Strahlen zu setzen ist. Die Energie, die von 1 gr Radium in einer Stunde ausgegeben wird, wird $0,035 \times 3600 = 126 \text{ gr Calorien}$; eine Zahl, die nicht wesentlich höher ist, als die neuesten Messungen von *Armströng*⁴⁶⁾. Hätten wir für die α -Strahlen $v = 1,5 \cdot 10^9$ angenommen, so wäre die Zahl schon zu klein geworden.

Zur Vervollständigung seien noch zwei Tabellen von *Rutherford* angeführt. Man erhält ein Bild für die Durchdringungsfähigkeit der verschiedenen Strahlengattungen, wenn man die Dicken von Aluminiumblättchen vergleicht, durch welche die Strahlungsintensität auf $\frac{1}{2}$ reduziert wird. Dieselben sind:

α -Strahlen: 0,0005 cm; β -Strahlen: 0,05 cm; γ -Strahlen: 8 cm.

Um die Wirkungen von Uran, Radium, Thorium und induzierter Aktivität zu vergleichen, seien hier die Luftschichten angegeben, durch welche die betreffende α -Strahlung auf $\frac{1}{2}$ reduziert wird, ferner das Verhältnis der Intensität der β - und α -Strahlen bei den drei radioaktiven Elementen:

<i>Radiokörper</i>	<i>Luftschicht</i>	<i>Verhältnis β/α</i>
Uran	4,3 mm	0,0074
Radium	7,5 mm	0,0033
Thor	10,0 mm	0,0020
Induz. Aktivität	16,5 mm	—

Das Auffinden weiterer numerischer Angaben verlangt schon die Kenntnis der Gesetze, nach denen der radioaktive Umwandlungsprozess sich vollzieht.

VII. Die Theorie der radioaktiven Umwandlung.

A. Theoretisches.

1. Grundlagen der Theorie.

Aus dem bisherigen geht zur Genüge hervor, dass die komplizierten Erscheinungen der induzierten Aktivität sich in

ungezwungenster Weise klar legen lassen, wenn dieselbe als eine Reihe sukzessive aus einander entstehender, materieller Produkte angesehen wird, d. h. als ein fortgesetzter Atomzerfall, dessen Grundgesetz sich stets auf die Form einfacher Exponentialfunktionen zurückführen lässt.

Diese Theorie soll in mathematischer Beziehung etwas eingehender verfolgt werden, auf Grund der von *Rutherford* gegebenen Darlegungen, die später von *Stark*⁷⁸⁾ zusammengefasst und vom Verfasser⁷⁹⁾ etwas detailliert worden sind.

Nehmen wir an, die Radioaktivität bestehe in einem inneren Umwandlungsprozess der Atome, begleitet von mehr oder weniger intensiver Elektronenstrahlung, so ist natürlich scharf zu unterscheiden zwischen dem *radioaktiven Umwandlungsprozess* selber und den *radioaktiven Wirkungen* desselben. Nur die letzteren sind unsern Instrumenten zugänglich und können in konventioneller Weise (z. B. durch die Ionisierung der Luft) gemessen werden. Die radioaktive Wirkung ist jene Grösse, die früher mit *J* bezeichnet worden ist.

Es handelt sich darum, zwischen diesem *J* und dem eigentlichen Umwandlungsprozess eine einfache Beziehung aufzustellen. Dieser Prozess ist aber charakterisiert durch die Geschwindigkeit, mit welcher die Atome zerfallen; diese Geschwindigkeit *q*, die sog. *Wandlungsstärke*, ist wiederum ein Mass für die radioaktive Wirkung *J*, es lässt sich also setzen: $J = k \cdot q$, wobei *k* ein blosser Proportionalitätsfaktor ist, der in erster Linie von der Messmethode von *J* abhängt, aber auch von der zu untersuchenden Strahlungsart (α -, β - oder γ -Strahlen).

Die Wandlungsstärke *q* ist aber ohne weiteres durch die Zahl der in Betracht fallenden, radioaktiven Atome auszu-drücken. Ist in einem Zeitmoment *t* die Zahl der umwandlungsfähigen Atome *N*, so ist die zeitliche Abnahme derselben

$$-\frac{dN}{dt} = q.$$

Bei Umwandlung eines *einzig*en radioaktiven Produktes lässt sich *J* durch eine einzige Exponentialfunktion darstellen:

$$J = J^0 \cdot e^{-\lambda t}.$$

Aus $J = kq = -k \frac{dN}{dt}$ folgt

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{J^0}{k} \cdot e^{-\lambda t}, \text{ integriert:}$$

$$N = \frac{J^0}{k\lambda} e^{-\lambda t} + C.$$

Die Integrationskonstante C ist Null, weil für $t = \infty$ alle Atome umgewandelt sind, $N = 0$ wird. Wird die Zahl der Atome zur Zeit $t = 0$ mit N^0 bezeichnet, so folgt:

$$N = N^0 \cdot e^{-\lambda t}, \text{ entsprechend } J = J^0 \cdot e^{-\lambda t}.$$

Darin liegt ein erstes Gesetz der Radioaktivität:

1. *Für ein einzelnes, radioaktives Produkt nimmt die Zahl der umwandlungsfähigen Atome nach demselben Gesetz ab, wie die radioaktive Wirkung.*

Zweckmässig ist die Einführung einer Differentialgleichung.

Aus obigem folgt: $-\frac{dN}{dt} = +\lambda N^0 \cdot e^{-\lambda t} = \lambda N.$

Durch Einführung von $J = k \cdot q$, $q = -\frac{dN}{dt}$ folgt:

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N; J = k \cdot \lambda N.$$

Erstere Gleichung gibt die Differentialgleichung des Umwandlungsprozesses, letztere liefert ein zweites Gesetz der Radioaktivität:

2. *Die radioaktive Wirkung eines einzelnen Produktes ist stets proportional der Zahl der noch nicht umgewandelten Atome, d. h. proportional der Menge der radioaktiven Substanz.*

Es möge eine *zweimalige* Umwandlung betrachtet werden. N_1 und N_2 seien die zur Zeit t vorhandenen Atome des ersten und des zweiten Umwandlungsproduktes. Der erste Zerfallprozess erfolgt gemäss obigen Gleichungen: $-\frac{dN_1}{dt} = \lambda_1 N_1$; $J_1 = k_1 \lambda_1 N_1$.

Für den weitem Zerfall der Atome zweiter Art in inaktive Atome dritter Art wird auch jetzt gelten $J_2 = k_2 \lambda_2 N_2$; denn die radioaktive Wirkung muss immer proportional der Zahl der nicht umgewandelten Atome bleiben. Dagegen ist die Differentialgleichung für N_2 abzuändern. Die zeitliche Abnahme $-\frac{dN_2}{dt}$ der Atome zweiter Art besteht einerseits aus Umwandlung in Atome dritter Art: $\lambda_2 N_2$; andererseits werden aus den Atomen erster Art immer wieder neue Atome zweiter Art gebildet. Es mögen aus 1 Atom erster Art je ν_2 Atome zweiter Art entstehen, demnach wird eine Vermehrung der letzteren pro Sekunde eintreten im Betrage von $\nu_2 \cdot \frac{dN_1}{dt}$. Es

wird also $-\frac{dN_2}{dt} = \lambda_2 N_2 - \nu_2 \frac{dN_1}{dt}$ und die erweiterten Differentialgleichungen lauten:

$$-\frac{dN_1}{dt} = \lambda_1 N_1; \quad -\frac{dN_2}{dt} = \lambda_2 N_2 - \nu_2 \lambda_1 N_1.$$

Die summierte radioaktive Wirkung wird:

$$J = J_1 + J_2 = k_1 \lambda_1 N_1 + k_2 \lambda_2 N_2.$$

Natürlich lassen sich diese Ausdrücke auf mehrfache Umwandlungen ausdehnen, so dass sie die Theorie in ihrer Allgemeinheit umfassen.

Rutherford führt in seinen Untersuchungen sofort eine spezielle Hypothese ein, die hier vermieden ist, die aber ihrer Einfachheit wegen meistens benützt wird. Er nimmt an, dass bei Umwandlung eines radioaktiven Atomes immer nur ein einziges Atom der folgenden Stufe erzeugt wird und nicht etwa mehrere. Bei der bisherigen Unkenntnis des Vorganges ist dies allerdings die nächst liegende Annahme; in unserer Formulierung würde sie bedeuten, dass die Grössen $\nu = 1$ zu setzen sind.

2. Zusammenfassung der Theorie.

Die vorigen Ausführungen lassen sich in folgende drei Sätze zusammenfassen, welche als Grundsätze der Umwandlungstheorie anzusehen sind:

1. Die Radioaktivität einer Substanz wird definiert als ein spontan erfolgender Umwandlungsprozess ihrer Atome.

2. Es wird angenommen, dass jede dieser Umwandlungen nach einem einfachen Exponentialgesetz mit unveränderlichen Konstanten stattfindet.

3. Es wird angenommen, dass die Intensität der radioaktiven Wirkung der momentanen Zerfallgeschwindigkeit der Atome proportional sei.

Daraus ergeben sich die allgemeinen Gleichungen:

$$(I) \quad -\frac{dN_1}{dt} = \lambda_1 N_1; \quad -\frac{dN_2}{dt} = \lambda_2 N_2 - \nu_2 \lambda_1 N_1;$$

$$-\frac{dN_3}{dt} = \lambda_3 N_3 - \nu_3 \lambda_2 N_2 \dots$$

$$(II) \quad J = k_1 \lambda_1 N_1 + k_2 \lambda_2 N_2 + k_3 \lambda_3 N_3 \dots$$

Hier sind $N_1, N_2, N_3 \dots$ die zur Zeit t vorhandenen Atomzahlen erster, zweiter, dritter Art; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \dots$ die zugehörigen Abklingungskonstanten; $\nu_2, \nu_3, \nu_4 \dots$ die Zerfallskonstanten (nach Rutherford: $\nu_2 = \nu_3 = \nu_4 = 1$) J die gesamte radioaktive Wirkung; $k_1, k_2, k_3 \dots$ Proportionalitätsfaktoren. Diese allgemeine, theoretische Grundlage soll nur auf ganz einfache Fälle angewandt werden.

3. Konstante Aktivität.

Wenn ein radioaktives Element längere Zeit sich selbst überlassen worden ist, so haben sich seine sämtlichen Umwandlungsprodukte bilden können, und es stellt sich ein stationärer Zustand ein, in welchem von jeder Stufe immer gleich viel entsteht als verschwindet, es besteht *radioaktives Gleichgewicht*. Freilich ist dieser Zustand nur dann möglich, wenn das primäre Produkt in solcher Quantität vorhanden ist, dass seine Masse durch den Zersetzungsprozess nicht merkbar vermindert wird, also praktisch konstant ist. Man nennt eine derartige Substanz *konstant aktiv*; dieser Fall ist bei den bekannten radioaktiven Präparaten tatsächlich erfüllt.

Sind N_1, N_2, N_3 , die Atomzahlen der verschiedenen Stufen zur Zeit t , so ist für die primäre Substanz N_1 konstant, weil es als unendlich gross im Vergleich zu den andern angenommen wird. Dabei kann aber die Zerfallsgeschwindigkeit $q_1 = -\frac{dN_1}{dt} = \lambda_1 N_1$ dennoch einen messbaren Wert aufweisen. Die andern Atomzahlen $N_2, N_3 \dots$, sind wirklich konstant, weil immer gleichviel Atome entstehen und zerfallen.

Die Bedingungen der konstanten Aktivität lauten also:

$$\frac{dN_2}{dt} = \frac{dN_3}{dt} = \frac{dN_4}{dt} = \dots = 0. \quad \text{Es folgt aus (I):}$$

$\lambda_2 N_2 - \nu_2 \lambda_1 N_1 = 0$	also:	$N_2 = \nu_2 \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_1$
$\lambda_3 N_3 - \nu_3 \lambda_2 N_2 = 0$		$N_3 = \nu_2 \nu_3 \frac{\lambda_1}{\lambda_3} N_1$
$\lambda_4 N_4 - \nu_4 \lambda_3 N_3 = 0$		$N_4 = \nu_2 \nu_3 \nu_4 \frac{\lambda_1}{\lambda_4} N_1$

Diese Gleichungen nehmen eine einfache Form an, wenn man die *Rutherford'sche* Hypothese einführt, dass *ein* Atom

immer nur *ein* neues Atom bildet, also $\nu_2 = \nu_3 = \nu_4 = 1$ setzt. Unter Beziehung von $q_1 = \lambda_1 N_1$ folgt:

$$q_1 = \lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \lambda_3 N_3 = \lambda_4 N_4 = \dots \quad \text{(III)}$$

als *Bedingungen der konstanten Aktivität*.

Dieselben gestatten eine zweifache Anwendung: Da man die Atomzahl N_1 der primären Elemente aus den Atomgewichten berechnen kann, so ist die Möglichkeit gegeben, aus den beobachteten Abklingungskonstanten $\lambda_1, \lambda_2, \dots$ die Atomzahlen und damit die Gewichtsmengen der verschiedenen induzierten Aktivitäten auszurechnen. Andererseits können aus bekannten Atomzahlen und aus einer Abklingungskonstante die andern Abklingungskonstanten ermittelt werden, so dass man Anhaltspunkte für den sehr langsamen, direkt nicht messbaren Zerfall der primären Elemente, wie Radium, Uran, Thor erhalten kann.

4. Mittlere Lebensdauer.

Zur Zeit t seien N -Atome eines radioaktiven Produktes vorhanden. Welches auch der Verlauf seiner Umwandlung sein mag, so zerfallen im Zeitelement dt : $q dt = -\frac{dN}{dt} dt = \lambda N dt$ Atome. Würde der Prozess gleichförmig ablaufen, so würden in einer Sekunde λN Atome zerfallen, und in $1/\lambda$ Sekunden wären $1/\lambda \cdot \lambda N$, also alle N Atome vernichtet. In Wirklichkeit erfolgt natürlich der Zerfall nicht gleichförmig, sondern anfangs rasch und dann immer langsamer. Aber um einen Mittelwert zu erhalten, kann man sich eine solche gleichförmige Umwandlung vorstellen: dann gibt der Bruch $1/\lambda = \tau$ ein Mass für die Lebensdauer der Substanz. Man nennt deshalb *den reziproken Wert der Abklingungskonstanten*, $\tau = \frac{1}{\lambda}$, die *mittlere Lebensdauer* des betreffenden Körpers. Die tatsächliche Lebensdauer ist selbstverständlich bedeutend grösser, immerhin gestattet τ ein Urteil über die Dauerhaftigkeit des radioaktiven Produktes. — Nach Berechnungen von *v. Schweidler*⁸⁰⁾ ist allerdings nach den Regeln der Wahrscheinlichkeitsrechnung jene Berechnungsweise nur innerhalb gewisser Grenzen zulässig.

5. Abklingung der induzierten Radiumaktivität.

Integriert man die Grundgleichungen (I) und (II) für den Fall, dass ein inaktiver Körper während Θ Sekunden in einer

konstanten Emanationsmenge von N Atomen eingetaucht war, und dass sich dabei (wie bei dem Radium) drei Umwandlungsstufen niederschlagen, so ist die zur Zeit t nach der Herausnahme noch vorhandene Aktivität gegeben durch die Formel⁷⁹⁾:

$$J = N \lambda_1 v_2 \left\{ \left(k_2 + \frac{\lambda_2 v_3}{\lambda_3 - \lambda_2} k_3 + \frac{\lambda_2 v_3 \lambda_4 v_4}{(\lambda_3 - \lambda_2)(\lambda_4 - \lambda_2)} k_4 \right) (1 - e^{-\lambda_2 \theta}) e^{-\lambda_2 t} \right. \\ \left. - \frac{\lambda_2 v_3}{\lambda_3 - \lambda_2} \left(k_3 + \frac{\lambda_4 v_4}{\lambda_4 - \lambda_3} k_4 \right) (1 - e^{-\lambda_3 \theta}) e^{-\lambda_3 t} \right. \\ \left. + \frac{\lambda_2 v_3 \lambda_3 v_4}{(\lambda_4 - \lambda_3)(\lambda_4 - \lambda_2)} k_4 (1 - e^{-\lambda_4 \theta}) e^{-\lambda_4 t} \right\}$$

Hier sind $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ die Abklingungskonstanten der Emanation und der drei induzierten Aktivitäten. Nach *Rutherford's* Hypothese ist $v_2 = v_3 = v_4 = 1$ zu setzen, ferner nimmt er an (p. 66), dass die vorletzte Umwandlung keine Strahlen aussende, also radioaktiv unwirksam sei, d. h. es ist dann $k_3 = 0$ zu nehmen.

Unter diesen Voraussetzungen lautet der Ausdruck:

$$J = N \lambda_1 k_4 \left\{ \left(\frac{k_2}{k_4} + \frac{\lambda_3 \lambda_4}{(\lambda_3 - \lambda_2)(\lambda_4 - \lambda_2)} \right) (1 - e^{-\lambda_2 \theta}) e^{-\lambda_2 t} \right. \\ \left. - \frac{\lambda_3 \lambda_4}{(\lambda_3 - \lambda_2)(\lambda_4 - \lambda_2)} (1 - e^{-\lambda_3 \theta}) e^{-\lambda_3 t} \right. \\ \left. + \frac{\lambda_2 \lambda_3}{(\lambda_4 - \lambda_3)(\lambda_4 - \lambda_2)} (1 - e^{-\lambda_4 \theta}) e^{-\lambda_4 t} \right\}$$

B. Numerisches.

1. Radium und Radium-Emanation.

Wir betrachten eine Radiumzelle im radioaktiven Gleichgewicht: ihre radioaktiven Grössen und Wirkungen bezogen auf das primäre Radium seien mit Index 1 bezeichnet, bezogen auf die Emanation mit Index 2. Nach (III) gilt dann:

$$q_1 = \lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2.$$

Diese fünf Grössen sind von ziemlichem Interesse:

Als sicher bekannt könnten gelten: Die Zahl Atome in einem gr Radium, resp. das ihnen im gasförmigen Zustand zukommende Volumen (p. 72), ferner die Abklingungskonstante der Emanation. Wir setzen: $N_1 = 4 \cdot 10^{21}$ Atome ~ 100 cm; $\lambda_2 = 2 \cdot 10^{-6}$ Sekunden⁻¹ in runder Zahl.

Durch *Ramsay's* Versuche sind mit einer gewissen Annäherung bekannt: Das Volumen, der in einer Sekunde aus

1 gr Ra entstehenden Emanation, also auch die demselben proportionale Zahl der Emanationsatome; diese Zahl ist aber (nach *Rutherfords* Annahme) genau gleich der Zahl der in einer Sekunde zerfallenden Radiumatome, d. h. gleich der Zerfallsgeschwindigkeit q_1 . Ferner das Volumen der in einem gr Ra im Gleichgewicht aufgespeicherten Emanation, also die demselben proportionale Atomzahl N_2 . (Die Umrechnung der Atomzahl aus dem Volumen ergibt sich — für einatomige Gase — durch Multiplikation des Volumens mit der *Loschmidt'schen* Zahl: $4 \cdot 10^{19}$).

Die Angaben von Ramsay p. 54 liefern:

$$N_2 \sim 10^{-3} \text{ cm}^3 = 4 \cdot 10^{16} \text{ Atome}$$

$$q_1 \sim 3 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^3 = 12 \cdot 10^{10} \text{ Atome per Sekunde.}$$

Beiläufig bemerkt ergibt der Vergleich dieser Zahlen mit $N_1 = 4 \cdot 10^{21}$, dass auf 100,000 Atome Radium je ein Atom Emanation okkludiert ist, und dass von je 34,000 Millionen Atomen Radium pro Sekunde eines zerfällt und ein Emanationsatom bildet.

Es ist aber noch möglich, auf anderem Wege einen Zahlwert für q_1 zu erhalten, nämlich durch Anwendungen der *Rutherford'schen* Zahl der ausgeschleuderten α -Teilchen. Wir fanden p. 73, dass entemanirtes, also primäres Radium, pro 1 gr in einer Sekunde $6,2 \cdot 10^{10}$ α -Teilchen ausschleudert. Nehmen wir hier wieder eine spezielle Hypothese *Rutherfords* zu Hülfe, wonach bei dem *Zerfall eines radioaktiven Atomes immer nur ein einziges α -Teilchen abgegeben werde* (und nicht mehrere), so müssen natürlich gerade so viel α -Teilchen ausgestrahlt werden, als Radiumatome zerfallen, d. h. jene Zahl gibt uns den Wert für q_1 . Es wäre demnach $q_1 = 6,2 \cdot 10^{10}$ Atome, während aus *Ramsay's* Messungen folgt $q_1 = 12 \cdot 10^{10}$ Atome. Die Zahlen sind der Grössenordnung nach vollständig übereinstimmend.

Natürlich können aus den Gleichungen $q_1 = \lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2$ in verschiedener Weise die Werte für q_1 und N_2 bei gegebenen λ_2 und N_1 kontrolliert werden. Wir nehmen folgende Mittelwerte an, die unter sich übereinstimmen:

$$N_1 \sim 100 \text{ cm}^3 = 4 \cdot 10^{21} = \text{Zahl der Atome in 1 gr primärem Radium.}$$

$N_2 \sim 0,75 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^3 = 3 \cdot 10^{16} =$ Zahl der Atome in
1 gr Emanation.

$q_1 \sim 1,5 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^3 = 6 \cdot 10^{10} =$ Zahl der Atome Emanation,
die in einer Sekunde aus 1 gr Radium gebildet werden.

$\lambda_2 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ Sekunden}^{-1} =$ Abklingungskonstante der
Emanation.

Daraus ist die *Abklingungskonstante des primären Radiums* zu berechnen:

$$\lambda_1 = 1,5 \cdot 10^{-11} \text{ Sekunden}^{-1} = 4,7 \cdot 10^{-4} \text{ Jahre}^{-1}.$$

Aus derselben ergibt sich die *Halbierungskonstante* =
1500 Jahre, und die *mittlere Lebensdauer* $\tau = \frac{1}{\lambda} = 2100 \text{ Jahre}$.

2. Die Dauer eines Radiumpräparates.

Die vorigen Berechnungen geben die Antwort auf das quälende Problem, das den Physikern durch die Entdeckung des Radiums gestellt wurde.

Die Theorie des Atomzerfalles verlangt unbedingt, dass jedes Radiumpräparat mit der Zeit seine Aktivität einbüsse; das Prinzip der Erhaltung der Energie und der Unzerstörbarkeit des Stoffes fordern dasselbe. Dessen ungeachtet liessen alle bisherigen Messungen der Radioaktivität nicht die geringste Abnahme wahrnehmen¹⁰⁾. Die grossen Zahlen zeigen, dass eben die kurze Zeitperiode, die seit der Entdeckung des Radiums verflossen ist, nicht genügt, um diese Abnahme zu konstatieren.

Das Radiumatom hat eine mittlere Lebensdauer von ungefähr 2000 Jahren; nach 1500 Jahren ist seine Aktivität erst um die Hälfte gefallen; ungefähr 20 Jahre sind erforderlich, um eine Abnahme von 1 % zu erzeugen (abgesehen davon, dass infolge sekundärer Prozesse zunächst keine Abnahme, sondern eine Zunahme der Radioaktivität eintritt s. p. 88). Es ist also verständlich, dass ein Abfall der radioaktiven Wirkung noch auf Jahre hinaus nicht mit Sicherheit nachweisbar sein wird.

Aber auch eine messbare Gewichtsabnahme der Radiumpräparate wird noch lange nicht eintreten.

Zunächst möge die in einem Jahre *ausgestrahlte Masse der α -Teilchen*, also die *produzierte Heliummenge* berechnet werden. Es ergab sich (p. 74), dass 1 gr Radium in einer

Sekunde $2,5 \cdot 10^{11}$ α -Teilchen ausgabe, somit $7,8 \cdot 10^{18}$ α -Teilchen, resp. Heliumatome, pro Jahr. Das Gewicht eines Atomes He wurde zu $4,5 \cdot 10^{-24}$ gr gesetzt (p. 74). Der Gewichtverlust in einem Jahr, den 1 gr Radium erleidet, beträgt demnach $7,8 \cdot 10^{18} \cdot 4,5 \cdot 10^{-24}$ gr = $0,035$ mgr. Da aber die gewöhnlichen Radiumzellen meistens nur einige cgr enthalten, so ergibt dies einen Massenverlust, der auf Jahre hinaus absolut unmessbar ist. Der Gewichtverlust von β -Teilchen ist noch viel kleiner, da die Masse derselben einige tausendmal geringer ist als diejenige der α -Teilchen.

Aus obiger Zahl ergibt sich das Volumen der produzierten Heliummenge. He ist ein einatomiges Gas, hat also pro 1 cm^3 $4 \cdot 10^{19}$ Atome. Das Volumen von $7,8 \cdot 10^{18}$ Atome ist somit $0,19 \text{ cm}^3$. In *einem Jahr produziert ein gr Radium eine Heliummenge, die etwa $0,2 \text{ cm}^3$ einnimmt*. Aus den Versuchen *Ramsay* (p. 54) ergab sich, dass 1 gr Radium in einer Sekunde $3 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3$ Emanation liefere, also in 1 Jahr ca. $0,09 \text{ cm}^3$. Da aber die Emanation sich in das vierfache Heliumvolumen umwandelt, so gibt dies pro Jahr $0,36 \text{ cm}^3$ Helium; diese Zahl ist in befriedigender Uebereinstimmung mit der vorigen Ausrechnung.

Grösser als der stoffliche Verlust durch α -Strahlung ist jedenfalls das *Quantum abgegebener Emanation*. Nach p. 83 gibt 1 gr Ra in einer Sekunde $6 \cdot 10^{10}$ Atome Emanation ab, also in einem Jahr rund $2 \cdot 10^{18}$ Atome. Wie gross ist aber das Gewicht dieser Atome? Die experimentellen Bestimmungen geben für das Molekulargewicht und somit auch für das Atomgewicht dieses einatomigen Gases etwa 90, nach andern Rechnungen 170. Die *Rutherford'schen* Hypothesen verlangen jedoch ein höheres Atomgewicht; denn jedes Radiumatom soll ein einziges Emanationsatom bilden, unter Aussendung eines einzigen α -Teilchens. So bleibt für das Atomgewicht der Emanation $225 - 4 = 221$ übrig. Diese Berechnung bildet jedenfalls einen der schwächsten Punkte der *Rutherford'schen* Theorie, sie ist aber nicht zu umgehen, sofern überhaupt numerische Angaben gemacht werden sollen.

Daraus folgt für das Gewicht eines Emanationsatomes: $221 \cdot 1,12 \cdot 10^{-24} = 250 \cdot 10^{-24}$ gr in runder Zahl.

Die in *einem Jahr von 1 gr ausgegebene Emanationsmenge* wird somit: $2 \cdot 10^{18} \cdot 250 \cdot 10^{-24} = 0,5 \text{ mgr}$. Bedenkt man, dass 1 gr Ra ein Präparat RaBr_2 von der nie gesehenen Menge von ca. 1,7 gr darstellt, und bedenkt man ferner, dass ein Teil dieses $\frac{1}{2}$ mgr, das pro Jahr produziert wird, in Form von induzierter Aktivität in der Radiumzelle verbleibt, so wird begreiflich, dass auch diese Gewichtsabnahme erst nach langen Jahren beobachtbar sein kann.

Die scheinbare Konstanz der Radiumwirkungen und der Radiummenge ist also kein Eingriff in die Grundprinzipien der Naturwissenschaft, sie ist im Gegenteil durch die Theorie des Atomzerfalles in einfacher Weise zu verstehen. Freilich ist damit das Problem der Radioaktivität doch nicht aus der Welt geschafft, sondern nur eine Stufe weiter hinausgeschoben. Woher es kommt, dass in den Atomen so gewaltige Energiemengen aufgespeichert sind, welches das geheimnisvolle Agens ist, das auslösend wirkt, um jene Fesseln des Atomverbandes zu sprengen — das sind Fragen, deren Beantwortung zur Stunde unmöglich ist.

3. Die radioaktive Energieabgabe.

Schon eine summarische Berechnung lässt übersehen, dass in den radioaktiven Atomen Energiemengen angehäuft sind, die über alle Erwartungen gross sind, und nur die Tatsache, dass dieser Energievorrat eben erst im Laufe der Jahrtausende verzehrt wird, erklärt, weshalb er eigentlich kaum wahrnehmbar ist.

Eine radioaktive Substanz besteht zur Zeit t aus N umwandlungsfähigen Atomen, die nach dem einfachen Gesetz $N = N^0 \cdot e^{-\lambda t}$ zerfallen. Dabei wird Energie in Form von Wärme abgegeben, es sei q die in einer Sekunde produzierte Wärmemenge. Dieselbe ist auch eine Funktion der Zeit und wird (wie durch Versuche von *Rutherford* und *Barnes* bestätigt wird) in gleicher Weise abnehmen wie N , also $q = Q^0 e^{-\lambda t}$. In jedem Zeitelement dt findet also eine Wärmeabgabe $q \cdot dt = Q^0 \cdot e^{-\lambda t} \cdot dt$ statt; während der ganzen Lebensdauer der Substanz, d. h. von der Zeit $t = 0$, zu der noch das radioaktive Gleichgewicht bestand, bis zur Zeit $t = \infty$, wird eine Gesamtwärme erzeugt:

$Q = \int_0^{\infty} Q^0 \cdot e^{-\lambda t} dt = \frac{Q^0}{\lambda} = Q^0 \tau$, wenn $\tau = \frac{1}{\lambda} =$ mittl. Lebensdauer ist.

Aus der *Wärmeproduktion Q^0 im radioaktiven Gleichgewicht wird durch Multiplikation mit der mittleren Lebensdauer die gesamte Energieabgabe gefunden*; bezogen auf die Menge 1 der Substanz gibt Q die *Wärmetönung des betreffenden Atomzerfalles*.

Genau genommen müssten die verschiedenen Umwandlungsstufen und ihre Wechselwirkung berücksichtigt werden. Allein die Abklingung des primären Radiums ist so langsam, dass man derselben gegenüber alle andern Stufen vernachlässigen kann; auch die Abklingung der Emanation gegenüber den induzierten Aktivitäten (Radium A, B, C) ist genügend gross, dass man dieselben nicht zu berücksichtigen braucht.

So ergeben sich folgende Zahlwerte:

Für *Radium* ist im Minimum die Wärmeproduktion von 1 gr in 1 Stunde 100 gr Calorien, also in 1 Jahr: 880,000 gr Cal.

Somit $Q^0 = 880,000$, ferner $\tau = \frac{1}{\lambda} = 2100$ Jahre.

Also $Q = Q^0 \tau = 1,850,000,000$ gr Cal.

Die in 1 gr *Radium aufgespeicherte Energie mag rund 2 Milliarden gr Calorien betragen*. Wenn man diese Zahl mit der höchst bekannten Wärmetönung vergleicht, nämlich mit der Wärme, die nötig ist um ein gr Wasser zu zersetzen, 3700 gr Cal., so sieht man, dass hier, wo Atomzerfall auftritt, 500,000mal grössere Energiemengen im Spiele sind, als da, wo es sich nur um molekulare Umsetzungen handelt.

Für *Radiumemanation* ist die Wärmeproduktion der in 1 gr Radium enthaltenen Emanationsmenge bestimmt worden: $Q^0 = 75$ gr Cal. pro Stunde. Dazu kommt $\lambda = 2,0 \cdot 10^{-6}$ Sekunden⁻¹ = $7,2 \cdot 10^{-3}$ Stunden⁻¹.

Demnach wird $Q = \frac{Q^0}{\lambda} = \frac{75}{7,2 \cdot 10^{-3}} =$ rund 10,000 gr Cal.

Aber die in 1 gr Radium aufgespeicherte Emanationsmenge (p. 83) hat ein Volumen von $0,75 \cdot 10^{-3}$ cm³. Es müssen demnach etwa 1300 gr Ra verfügbar sein, um einen cm³ Emanation zu liefern; *dieser eine cm³ Emanation würde aber während seiner Lebensdauer von wenigen Wochen eine Energie von über 10 Millionen gr Calorien abgeben*.

4. Die Gleichgewichtsmengen der einzelnen Umwandlungsstufen des Radiums (Radiotellur).

Die Gleichungen (III) des radioaktiven Gleichgewichtes gestatten Rückblicke auf die in einem Radiumpräparat angehäuften Mengen der verschiedenen Umwandlungsprodukte.

$$q_1 = N_1 \lambda_1 = N_2 \lambda_2 = N_3 \lambda_3 = \text{--- --}$$

Da q_1 und N_1 für das primäre Radium als bekannt gelten, ferner $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \dots$ beobachtbar sind, so sind sämtliche Atomzahlen $N_2, N_3 \dots$ berechenbar. Durch Multiplikation mit den Atomgewichten ergeben sich dann die Gewichtsmengen selber.

Diese Atomgewichte sind freilich unbekannt; aber wie schon früher erwähnt, p. 84, ergeben sie sich aus dem Atomgewicht des Radiums durch sukzessive Subtraktion des Gewichtes eines α -Teilchens, also vier. Die Differenzen sind so gering, dass ein Mittelwert für alle Atomgewichte genommen werden kann: das Gewicht eines Atomes wird im Mittel = $250 \cdot 10^{-24}$ gr gesetzt.

Die Resultate in runden Zahlen lassen sich tabellarisch zusammenstellen:

	<i>Radium</i>	<i>Emanation</i>	<i>Rad. A</i>	<i>Rad. B</i>
λ Sekunden ⁻¹	$1,5 \cdot 10^{-11}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$5,4 \cdot 10^{-4}$
N	$4 \cdot 10^{21}$	$3 \cdot 10^{16}$	$1,5 \cdot 10^{13}$	$1,1 \cdot 10^{14}$
Gewicht in mgr	1000	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-6}$	$2,8 \cdot 10^{-5}$
	<i>Rad. C</i>	<i>Rad. D</i>	<i>Rad. E</i>	<i>Rad. F</i>
λ Sekunden ⁻¹	$4,1 \cdot 10^{-4}$	$5,6 \cdot 10^{-10}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$5,6 \cdot 10^{-8}$
N	$1,5 \cdot 10^{14}$	$1,5 \cdot 10^{20}$	$4,5 \cdot 10^{16}$	$1,0 \cdot 10^{18}$
Gewicht in mgr	$3,3 \cdot 10^{-5}$	25,0	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-1}$

Die Zahlen bestätigen die früheren Angaben, wonach die Emanation, und die drei rasch verklingenden Aktivitäten (A, B, C) in unmessbar kleinen Mengen auftreten. Es ist also hoffnungslos, diese Substanzen durch Wägung oder auch nur durch chemisch-analytische Mittel nachweisen zu wollen, sogar der Spektralanalyse entgehen sie, nur die Beobachtung ihrer Radioaktivität zeigt sich hier als genügend feines Reagens.

Jene Zahlen geben auch Aufschluss über die *spezifische Aktivität* der einzelnen Radiumprodukte. Im radioaktiven Gleichgewicht zerfallen und entstehen immer gleich viel Atome

aller Stufen; die Zerfallsgeschwindigkeit q ist also dieselbe, die radioaktive Wirkung $J = k q$ der angehäuften Menge ist überall gleich. Da aber diese Mengen sehr verschieden sind, so müssen ihre *spezifischen radioaktiven Wirkungen* (d. h. die Wirkungen bezogen auf die gleiche Menge) enorm variieren. Z. B. hat das Radium C nach obiger Tabelle eine 30 Millionen mal geringere Menge als das primäre Radium, d. h. die induzierte Radiumaktivität C ist 30 Millionen mal wirksamer als das primäre Radium. Ebenso ist das Radium F etwa 4000 mal spez. aktiver als das primäre Radium. Da aber das Radium F identisch ist mit dem *Radiotellur*, so erklärt dies bis zu einem gewissen Grade die schönen Erscheinungen, die nach *Marckwald* schon bei geringen Radiotellurmengen beobachtet werden.

Das *Radium D*, die aktive Substanz des *Radiobleis*, müsste nach obiger Tabelle über 2 % des Radiumpräparates bilden. Das ist eine Masse, die gewiss nicht unbeachtet bleiben kann; allein sie tritt in den bisher dargestellten Radiumpräparaten noch nicht auf, weil das Radium D sich nur ganz langsam bildet; nach *Rutherford's* Berechnung würde das Radium D erst nach ungefähr 200 Jahren den Maximalbetrag von 2,5 % erreicht haben, immerhin glaubt *Rutherford* an einzelnen, einige Jahre alten Präparaten das Radium D, resp. das daraus entstehende Radium E, nachgewiesen zu haben.

Aber in der Natur, dort, wo das Radium seit Jahrtausenden ungestört seinen Zersetzungsprozess vollführen konnte, dort müssen die verschiedenen Umwandlungsstufen schon lange im Gleichgewichtszustande auftreten. Sind also die theoretischen Berechnungen richtig, so müssten z. B. in der Pechblende auf je ein gr Radium 25 mgr *Radiobleis* und 0,25 mgr *Radiotellur* auftreten. Nimmt man an, dass Pechblende etwa 50 % Uran enthalte, und dass auf 1 gr Uran je ein Millionstel gr Ra vorhanden sei, so würde 1 Tonne Pechblende 500,000 gr Uran, $\frac{1}{2}$ gr Radium und etwa 0,13 mgr *Radiotellur* enthalten.

Marckwald hat nun aus 15 Tonnen Pechblende 3 mgr *Radiotellur* dargestellt; nach unserer Rechnung würden sich ergeben: 15 · 0,13, also etwa 2 mgr *Radiotellur*. Die Uebereinstimmung ist befriedigend, möglicherweise ist das *Marckwald'sche* Präparat nicht völlig rein gewesen.

5. Abklingung des Thors und des Urans.

Für *Thor* und *Uran* sind die empirisch bestimmbaren Zahlenwerte nicht in dem Grade ermittelt worden, wie bei dem Radium. Die nachfolgenden Ausrechnungen zeigen demnach einen weitgehend hypothetischen Charakter. (Für *Aktinium* ist es überhaupt noch nicht möglich, derartige Zahlen anzugeben).

Um zum Ziele zu gelangen, muss von einer Vergleichung zwischen Thor, resp. Uran, und Radium ausgegangen werden; dabei kann es sich nur um rohe Abschätzung handeln.

Es wird angenommen, dass die α -Aktivität des *Urans* und des *Thors* etwa eine Million mal geringer sei, als diejenige des *Radiums*, auf gleiche Massen bezogen. Dies bedeutet, dass die beiden ersteren Elemente 10^6 mal weniger α -Teilchen ausstrahlen, als Radium. Da 1 gr Radium in einem Jahr $7,8 \cdot 10^{18}$ α -Teilchen produziert, so wird 1 gr Uran oder 1 gr Thor in einem Jahr rund $8 \cdot 10^{12}$ Teilchen ausschleudern. Jedoch ist ein wesentlicher Unterschied zwischen diesen beiden Elementen festzuhalten: Uran geht durch eine einzige α -strahlende Umwandlungsstufe, es zerfallen also gerade so viel Uranatome als α -Teilchen abgegeben werden, also ist die Wandlungsstärke des Urans auf 1 Jahr bezogen $q = 8 \cdot 10^{12}$. Thor dagegen hat fünf Umwandlungen (Thor-, Thor X-, Emanation-, Thor A-, Thor B-Endprodukt), von denen vier mit α -Strahlung erfolgen; auf ein zerfallendes Thoratom kommen demnach vier α -Teilchen, die Wandlungsstärke des Thors wird $q = 2 \cdot 10^{12}$.

Da das Atomgewicht des Urans und des Thors nicht sehr verschieden ist von demjenigen des Radium, so kann angenähert dieselbe Atomzahl pro 1 gr für alle drei Elemente angenommen werden, $N = 4 \cdot 10^{21}$.

Hieraus ergibt sich die Abklingungskonstante λ aus $q = \lambda N$, ferner in bekannter Weise die Halbierungskonstante und die mittlere Lebensdauer.

Uran: $\lambda = 2 \cdot 10^{-9}$ Jahre $^{-1}$; H. C. = $3,5 \cdot 10^8$ Jahre;
 $\tau = 5 \cdot 10^8$ Jahre.

Thor: $\lambda = 5 \cdot 10^{-10}$ Jahre $^{-1}$; H. C. = $1,4 \cdot 10^9$ Jahre;
 $\tau = 2 \cdot 10^9$ Jahre.

Die Aktivität dieser beiden radioaktiven Elemente mag nach 100—1000 Millionen Jahren erst auf die Hälfte gesunken sein.

Für das Thor lassen sich noch aus den Gleichungen des radioaktiven Gleichgewichtes $q_1 = \lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 \dots$ die Mengen der vorhandenen Menge Thor X und Thor Emanation berechnen. Es ergibt sich, dass 1 gr Thor einige Millionmal weniger Emanation in sich anhäuft als 1 gr Radium, und dass die in 1 gr Thor enthaltene Menge Thor X nicht einmal ein Hundertmillionstel mgr beträgt. Und doch ist diese winzige Menge durch ihre radioaktiven Wirkungen wahrnehmbar!

C. Tabelle der radioaktiven Konstanten.

Radioaktive Substanzen	Abklingkonstante λ in Sek. ⁻¹	Halbierungskonstante H. C.	Mittlere Lebensdauer $\tau = 1/\lambda$	Strahlungen
Uran	(2.10 ⁹ Jahre ⁻¹)	(3,5.10 ⁸ Jahre)	(5.10 ⁸ Jahre)	α -Str.
Uran X	3,6.10 ⁷	22 Tage	32 Tage	β - (γ -)
Endprodukt	—	—	—	—
Thorium	—	—	—	—
Radiothorium	(5.10 ¹⁰ Jahre ⁻¹)	(1,4.10 ⁹ Jahre)	(2.10 ⁹ Jahre)	α -
Thor X	2,0.10 ⁶	4 Tage	5,8 Tage	α -
Emanation	1,28.10 ²	54 Sekunden	78 Sekunden	α -
Thor A	1,75.10 ⁻⁵	11 Stunden	15,8 Stunden	Keine
Thor B	2,08.10 ⁻⁴	55 Minuten	78 Minuten	α -, β -, γ -
Endprodukt	—	—	—	—
Aktinium	—	—	—	Keine
Aktinium X	7,8.10 ⁷	10,3 Tage	14,7 Tage	α -, β -, γ -
Emanation	1,87.10 ⁻¹	3,7 Sekunden	5,4 Sekunden	α -
Aktinium A	3,2.10 ⁻⁴	36 Minuten	52 Minuten	Keine
Aktinium B	5,4.10 ⁻³	1,5 Minuten	2,2 Minuten	α -, β -, γ -
Endprodukt	—	—	—	—
Radium	(1,5.10 ¹¹)	(1500 Jahre)	(2100 Jahre)	α -
Emanation	2,08.10 ⁻⁶	3,85 Tage	5,6 Tage	α -
Radium A	4,01.10 ⁻³	2,9 Minuten	4,2 Minuten	α -
Radium B	5,33.10 ⁻⁴	21 Minuten	30 Minuten	Keine
Radium C	4,13.10 ⁻⁴	28 Minuten	40 Minuten	α -, β -, γ -
Radium D	5,6.10 ⁻¹⁰	40 Jahre	58 Jahre	Keine
Radium E	1,3.10 ⁻⁶	6 Tage	8,6 Tage	β - (γ -)
Radium F	5,6.10 ⁻⁸	143 Tage	207 Tage	α -
Endprodukt	—	—	—	—

VIII. Die Entstehung der radioaktiven Elemente.

A. Die Bildung des Radiums aus Uran.

Die Berechnung der mittleren Lebensdauer des Radiums zu etwa 2000 Jahren hat den Physikern ein unerwartet neues Problem gestellt.

Wenn das Radium schon nach einigen Tausend Jahren den grössten Teil seiner Aktivität eingebüsst hat, wie verhielt es sich denn in grauer Vorzeit? Wie trat es in den älteren, geologischen Schichten auf? War die ganze Erde einmal ein enormer Herd radioaktiver Wirkungen, die jetzt auf wenige Spuren abgeklungen sind? Oder ist vielleicht das Radium ein relativ junges Produkt, das selber erst vor vielen Jahrhunderten entstanden ist?

Selbstverständlich ist die zweite Hypothese weitaus befriedigender, und die Annahme, dass das Radium keine primär aktive Substanz sei, sondern nur eine allerdings sehr langsam zerfallende Umwandlungsstufe eines anderen Elementes, scheint fast unumgänglich.

Welches ist denn dieses andere Element, die eigentliche Muttersubstanz des Radiums? Es liegt nahe, an das Uran zu denken; denn das Uran hat das schwerste aller Atome, das Uran wandelt sich langsam im Laufe der Jahrtausende um, vom Uran ist bisher nur eine aktive Umwandlungsstufe (U.X) bekannt, während sein Endprodukt bis zur Stunde noch nicht konstatiert werden konnte.

Zur Prüfung dieser Hypothese sind zwei Wege möglich: Zunächst indirekt. Wenn das Radium nur aus Uran entstanden ist, so müssen überall in der Natur die beiden Elemente bei einander sein, ja sogar muss der Radiumgehalt eines Minerals immer proportional seinem Urangehalt sein, und zwar im Verhältnis ihrer Abklingungskonstanten, gemäss den Gleichungen des radioaktiven Gleichgewichtes.

Dass Uran und Radium unzertrennlich in allen Mineralien mit einigen leicht erklärlichen Ausnahmen vorkomme, wurde früher bemerkt (p. 28). *Boltwood*⁸¹⁾ war aber der erste, der im Mai 1904 eine Mitteilung publizierte, wonach in einzelnen

Mineralien eine Proportionalität zwischen Uran- und Radium-Gehalt zu finden sei. Bald darauf fand *Mc. Coy*⁸²⁾ ebenfalls eine solche Proportionalität, und a. 1905 konnte *Boltwood* eine Liste von 22 Mustern von 12 verschiedenen Mineralien aufstellen, bei denen die gewünschte Konstanz des Verhältnisses zwischen Uran- und Radiummenge befriedigend hervortrat.

Aus den numerischen Angaben lässt sich aber der Zahlwert dieses Verhältnisses theoretisch bestimmen.

Im radioaktiven Gleichgewicht ist $\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2$, also $\frac{N_1}{N_2} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$. Da die Atomgewichte des Urans und Radiums der Grössenordnung nach gleich sind, so kann das Verhältnis der Atomzahlen $\frac{N_1}{N_2}$ auch approximativ als Verhältnis der Gleichgewichtsmengen angesehen werden. Die gesuchte Proportion wäre demnach $\frac{\lambda_1}{\lambda_2}$. Für Uran ist $\lambda_2 = 2 \cdot 10^{-9}$, für Radium $\lambda_1 = 4,7 \cdot 10^{-4}$, es wird also $\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = 2,4 \cdot 10^5$. In runder Zahl müsste ein radioaktives Mineral auf 250,000 gr Uran 1 gr Radium enthalten. Eine derartige numerische Bestimmung ist von *Rutherford* und *Boltwood*⁸³⁾ durch Vergleichung der in einem Mineral produzierten mit der aus reinem RaBr_2 entstehenden Emanationsmenge ausgeführt worden. Sie finden in radioaktiven Gesteinen auf je 1 gr Uran etwa $7,4 \cdot 10^{-7}$ gr Radium, also auf 1,350,000 gr Uran je ein gr Radium. Diese Zahl ist zwar 5—6 mal grösser als die theoretisch bestimmte; allein bei der sehr grossen Unsicherheit im Wert der Grössen λ_1 und λ_2 ist dies immerhin als Bestätigung anzusehen.

Weitaus schwieriger ist die direkte Prüfung der Hypothese, die Untersuchung, ob wirklich *aus reinem Uran im Laufe der Jahre Radium* entstehe. Ganz unmöglich ist diese Messung nicht, wie folgende Rechnung zeigt:

Wenn das Uran nach dem Gesetze $N^0 \cdot e^{-\lambda t}$ abklingt, wobei N^0 die Zahl Uranatome bei Beginn der Umwandlung angibt, so ist die Zahl n der nach der Zeit t zerfallenen Atome, also der neu gebildeten Radiumatome: $n = N^0 (1 - e^{-\lambda t})$. Es gibt somit $\frac{n}{N^0}$ das Verhältnis der in der Zeit t gebildeten Radiummenge zur ursprünglichen Uranmenge (denn die Atomgewichte von U.

und Ra können in Annäherung als gleich angesehen werden). Aus dem Wert $\lambda = 2 \cdot 10^{-9}$ Jahre für Uran ergibt sich für die Zeit $t = 1$ Jahr: $\frac{n}{N_0} = 2 \cdot 10^{-9}$, d. h. im Laufe eines Jahres mussten aus 1 kg reinen Urans $2 \cdot 10^{-3}$ mgr, also zwei Tausendstel mgr Radium entstanden sein. So gering auch diese Menge ist, so ist ihre Aktivität doch genügend stark, dass die aus ihr sich bildende Radiumemanation nachweisbar wird.

*F. Soddy*⁸⁴⁾ hat sich an die Untersuchung dieser ausserordentlich schwierigen Bestimmung herangewagt. Seine Erstlingsversuche gaben ein negatives Resultat. Dagegen gelang es ihm später, Spuren von Emanation in lange aufbewahrten, reinen Uranpräparaten aufzufinden. Im Mai 1903 wurde ein völlig radiumfreies Präparat von 1 kg Urannitrat dargestellt und am 13. Juni sorgfältig abgeschlossen. Nach sieben Tagen wurde seine Radioaktivität geprüft, nachher wurde es längere Zeit sich selbst überlassen, während den letzten 9 Monaten war es vollständig ungestört geblieben. Ende Dezember 1904 und Anfangs Januar 1905 fanden wieder Aktivitätsmessungen statt. Dieselbe war auf etwa das zwanzigfache des Anfangswertes angewachsen; ausserdem liess sich aber in dem Präparat eine ziemlich kräftige Emanation nachweisen, die in etwa vier Tagen ihre halbe Aktivität einbüsste, also unzweifelhaft Radiumemanation war. Die Versuche bestätigen somit in direkter Weise die Uranhypothese. Freilich stimmen sie nicht mit der Theorie überein; nach den Berechnungen hätte *Soddy* $1,5 \cdot 10^{-6}$ gr Radium in seinem Uran vorfinden sollen, die von ihm bestimmte Emanationsmenge ist aber auf nur $1,6 \cdot 10^{-9}$ gr Ra zurückführbar, also auf einen tausend mal geringeren Radiumgehalt.

Aber auch diese Zahlen sind von *Boltwood*⁸⁵⁾ angefochten worden; er hat bei ähnlichen Versuchen keine derartige Emanationsbildung sicher nachweisen können und er hebt mit Nachdruck hervor, dass in *Soddy's* Laboratorium wahrscheinlich Infektion durch fremde Radiumemanation stattfand, die die Zuverlässigkeit seiner Messungen sehr in Frage stellt. Immerhin bestreitet *Boltwood* keineswegs die Uranhypothese selber, sondern er betont nur, dass die entstehende Radiummenge jedenfalls wesentlich kleiner ist, als die theoretisch erwartete.

Der Grund dieser Abweichung ist leicht einzusehen; es ist ja kaum zu erwarten, dass das aus dem Uran gebildete U. X sich sofort in Radium umsetze, sondern es ist wahrscheinlicher, dass noch ein oder zwei Zwischenstufen erfolgen, so dass die in einem Jahr aus Uran gebildete Radiummenge viel kleiner wird, als dies bei direkter Umwandlung der Fall wäre.

Obgleich der direkte, sichere Beweis der Umwandlung des Urans in Radium noch aussteht, so kann doch dieselbe zur Zeit als ziemlich wahrscheinlich angenommen werden, wenn auch unter Beiziehung einer oder zweier unbekannteren Zwischenstufen. Ob diese Zwischenstufen vielleicht bei dem Aktinium zu finden sind, ist eine reine Vermutung; das Thor jedenfalls mit dem Radiothorium bildet eine eigene Umwandlungsreihe, die kaum mit derjenigen des Urans verwandt sein mag.

B. Die Evolution der chemischen Elemente.

Wenn das Bild des Umwandlungsprozesses des Urans und des Radiums vollständig werden soll, so muss auch das inaktive Schlussprodukt des ganzen Zerfalles festgestellt werden. Dass das Helium wohl kaum jenes Schlussprodukt sei, ist bereits bemerkt worden. Wie kann denn jenes Endglied gefunden werden? Es scheint hoffnungslos dasselbe in den nächsten Jahrzehnten oder sogar Jahrhunderten direkt aufzufinden zu können; denn der Atomzerfall des Radiums und seiner Abkömmlinge verläuft viel zu langsam und die entstehenden Produkte sind in viel zu geringen Mengen vorhanden (p. 87), als dass dieselben in absehbarer Zeit chemisch nachweisbar wären. Und da jenes Endprodukt eben nicht mehr radioaktiv ist, so kann es nur noch in Form eines gewöhnlichen, chemischen Elementes auftreten. Nur indirekte Schlüsse und kühne Hypothesen können hier zum Ziele führen.

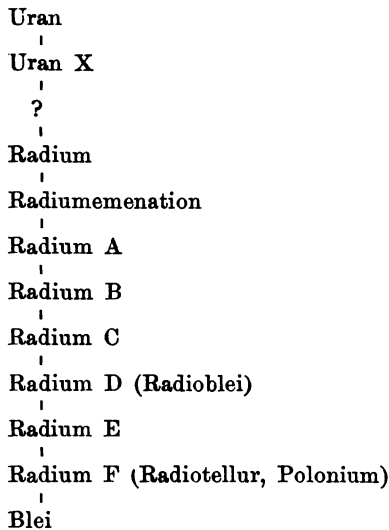
Natürlich muss dieses letzte Produkt überall vorhanden sein, wo Uran und Radium seit undenkbaren Zeiten im Schoße der Erde ruhten, d. h. in allen radioaktiven Mineralien. Und zwar wird derselbe möglicherweise in ganz erheblichen Quantitäten vorkommen; denn während alle Zwischenstufen der Umwandlung nach den Gesetzen des radioaktiven Gleichge-

wichtiges in ganz bestimmten (sehr geringen) Mengen auftreten, muss sich die letzte Stufe, die ja nicht weiter zerfällt, beständig anhäufen. Es wird sogar möglich sein, wenn dieses Endprodukt einmal bekannt ist, aus seiner Menge und aus den Abklingungskonstanten Schlüsse auf das Alter des Radiums, ja sogar des Urans zu ziehen.

Eine Vermutung über die Natur dieses Endproduktes geben uns die *Rutherford'schen* Hypothesen. Nach denselben ist der Umwandlungsprozess des Radiums genau charakterisiert: Das Radium geht durch sieben Stufen in sein Endprodukt über; es finden acht Umwandlungen statt, zwei davon sind strahlungslos, eine gibt nur β -Strahlen aus, bei den fünf andern wird jedesmal von jedem Atom immer ein α -Teilchen ausgesendet. Diese Hypothese ist anfechtbar; wenn sie aber richtig ist, so gibt sie ohne weiteres das Atomgewicht des Endproduktes: Das Radium hat ein Atomgewicht 225, es verliert im ganzen fünf α -Teilchen, d. h. fünf Heliumatome vom Gewicht 4, es verbleibt demnach für das Endprodukt ein Atomgewicht 205, eine Zahl, die natürlich nur approximativ gilt, da das Atomgewicht des Radiums selber noch nicht sicher gestellt ist.

Die Elemente, die fast allgemein in den radioaktiven Gesteinen neben Uran vorkommen, und die somit Desaggregationsprodukte desselben sein könnten, sind nach *Boltwood*³¹⁾: Blei, Wismuth, Barium, seltene Erden, Argon, Helium, Wasserstoff. Von derselben hat Blei das Atomgewicht 207, Wismuth 208,5. Es liegt deshalb nach *Rutherford* ausserordentlich nahe, das *Blei als das Endprodukt der ganzen Radiumumwandlung anzusehen*.

Wenn diese kühnen Hypothesen sich je bewahrheiten sollten, so wären wir zu ganz neuen Erkenntnissen im Gebiet der Chemie gelangt. Wir stünden dann vor der zweifach neuen Tatsache: dem *Auftreten eines Atomzerfalles* und der *Evolution chemischer Elemente*. Wir könnten dann einen Stammbaum aufstellen, der zum erstenmale eine Brücke schlägt von einem chemischen Element zu einem andern und dessen Zwischenglieder fast lückenlos bekannt sind. Dieser Stammbaum zwischen Uran und Blei stellt sich nach *Rutherford* folgendermassen dar:



Wohl am ersten wird sich diese Schlussfolgerung dadurch prüfen lassen, dass im Laufe der Jahrzehnte festgestellt wird, was für ein chemisches Element aus reinen Radiotellurpräparaten entsteht.

Unsere menschliche Natur ist immer zu Verallgemeinerungen geneigt. Wo eine kleine, neue Erkenntnis uns zu Teil wird, da glauben wir, die unermesslichen Horizonte, die sich unserem Auge eröffnen, schon durchschauen zu können. So locken denn die obigen Auseinandersetzungen, so sehr hypothetisch sie sind, zu weiteren, kühn ausgebauten Vermutungen. Ein alt gehegter Wunsch der Chemiker, ja eigentlich der alte Traum der Alchymisten, scheint in Erfüllung zu gehen! Die Schranken zwischen den Elementen werden durchbrochen, schon ahnen wir ein Urelement, durch dessen verschiedenartige Agglomeration die Fülle der Elemente entstanden sei. Wie das Blei mit dem Uran, so mögen alle andern Elemente durch unbekannte, verwandschaftliche Bande an einander geknüpft sein und durch seltsame Prozesse — eben jene Prozesse, die in den glanzvollen Erscheinungen der Radioaktivität sich enthüllt haben — auseinander hervorgehen.

Es ist freilich ein Wagnis sondergleichen, den Gedanken der Evolution auch in die anorganische Welt übertragen zu wollen, ja direkt in die letzten Elementarbestandteile derselben, in die Atome, hinein zu legen. Doch befriedigt dieser Gedanke unser wissenschaftliches Bedürfnis nach Einheit, und deshalb greifen wir lebhaft zu, auch wenn kaum ein schwacher Ansatz zu einem ersten Bindegliede zwischen zwei Elementen (Blei und Uran) zu bestehen scheint. Um so mehr müssen wir uns der Schwierigkeiten dieser Hypothesen bewusst bleiben und uns nicht verwundern, wenn über kurz oder lang Tatsachen auftreten sollten, die jeder Unterordnung unter das Evolutionsprinzip spotten könnten. Ueberall wo der Entwicklungsgedanke gewissenhaft und gründlich geprüft worden ist, haben sich solche Schwierigkeiten gefunden.

Aber auch dann, wenn jene sprunghafte Evolution der Materie sich bestätigen sollte, auch dann, wenn es uns vergönnt würde, nachzuweisen, wie Atom für Atom zerschellt, und Element aus Element sich bildet, auch dann, wenn die Radioaktivität uns tiefe Einblicke in das Wesen des Atoms gestattete, stets bleiben die alten, grossen Probleme nach dem Wesen der Materie und nach dem Ursprunge der Kraft in ihrer vollen Wucht bestehen — als Fragen, auf welche unsere Wissenschaft keine Antwort zu finden vermag.



Literatur-Verzeichnis.

- 1) *E. Rutherford*. Radio-Activity. — Cambridge 1904.
(Die 2. Auflage, 1905, war dem Verfasser erst in letzter Zeit zugänglich. Derselben wurden die Figuren p. 61, 66, 67 entnommen.)
- 2) *E. Rutherford*. The Succession of Changes in Radioactive Bodies. Bakerian Lecture. Phil. Trans. Roy. Soc. London. A. 204 — 1904.
- 3) *H. Becquerel*. Recherches sur une propriété nouvelle de la matière. — Mémoires de l'académie des sciences de l'institut de France. Tome 46. — 1903.
- 4) *S. Curie*. Recherches sur les substances radioactives. 2^{me} édit. Paris 1904.
- 5) *F. Soddy*. Die Radioaktivität vom Standpunkt der Desaggregationstheorie elementar dargestellt. Unter Mitwirkung von L. F. Guttman, übersetzt von G. Siebert. — Leipzig 1904.
- 6) *K. Hofmann*. Die radioaktiven Stoffe — Leipzig 1904.
- 7) *G. C. Schmidt*. Die Kathodenstrahlen. — Die Wissenschaft, Heft 2. Braunschweig 1904.
- 8) *Comptes Rendus* du premier congrès international pour l'étude de la radiologie et de l'ionisation, tenu à Liège du 12—14 sept. 1905. (Lütticher-Berichte).

Die obigen acht Publikationen bildeten in erster Linie das Quellenmaterial für die vorliegende Arbeit. Die Angaben, die denselben entnommen sind, sind im Allgemeinen nicht näher bezeichnet.

Sofern es sich aber um neuere Untersuchungen handelt, in den Jahren 1904—1906, oder um Feststellung einiger historisch interessanter Punkte, ist meistens direkt auf die Originalabhandlungen zurückgegriffen worden deren Zusammenstellung hier in extenso erfolgt.

- 9) *G. C. Schmidt*. Ueber die von den Thorverbindungen und einigen andern Substanzen ausgehenden Strahlungen. Wied. Ann. 65. p. 141. — 1898.
- 10) *A. Heydweiller*. Zeitliche Gewichtsveränderungen radioaktiver Substanzen. Phys. Zeits. 4. p. 81. — 1902.
E. Dorn. Versuch über die zeitliche Gewichtsveränderung von Radium. Phys. Zeits. 4. p. 530. — 1903.
A. Voller. Versuche über die zeitliche Abnahme der Radioaktivität und über die Lebensdauer geringer Radiummengen im Zustande sehr feiner Verteilung. — Phys. Zeits. 5. p. 781. — 1904.
A. S. Eve. Die Eigenschaften geringer Radiummengen. Phys. Zeits. 6. p. 267. — 1905.
E. Rutherford. Anmerkung dazu. — Phys. Zeits. 6. p. 269. — 1905.
A. Voller. Erwiderung hierzu. — Phys. Zeits. 6. p. 409. — 1905.

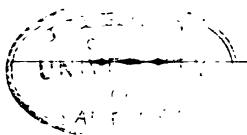
- 11) *Elster und Geitel*. Ueber die durch atmosphärische Luft induzierte Radioaktivität. — *Phys. Zeits.* **3**, p. 76. — 1901.
- 12) *E. Dorn*. Ueber die von radioaktiven Substanzen ausgesandte Emanation. *Abh. der naturf. Ges. Halle a/S.* p. 22. — 1900.
- 13) *E. Rutherford und F. Soddy*. The cause and nature of radioactivity. *Phil. Mag.* (6) **4**, p. 370, p. 569. — 1902.
- 14) *Elster und Geitel*. Ueber die radioaktiven Substanzen, deren Emanation in der Bodenluft und der Atmosphäre enthalten ist. *Phys. Zeits.* **5**, p. 11. — 1904.
- 15) *A. Gockel*. Ueber die in Thermalquellen enthaltenen radioaktiven Emanationen. — *Phys. Zeits.* **5**, p. 594. — 1904.
- 16) *G. v. d. Born*. Der Emanationsgehalt der Quellwasser des Simplontunnels. — *Jahrb. d. Radioakt.* **2**, p. 142. — 1905.
- 17) *F. Himstedt*. Ueber die radioaktive Emanation der Wasser- und Oelquellen. — *Phys. Zeits.* **5**, p. 210. — 1904.
J. J. Thomson. Experiment on induced radioactivity in air, and on the electrical conductivity produced in gases, when they pass through water. — *Phil. Mag.* (6) **4**, p. 352. — 1902.
E. P. Adams. Water-radioactivity. — *Phil. Mag.* (6) **6**, p. 563. — 1903.
- 18) *H. L. Cooke*. A penetrating radiation from the earth's surface. *Phil. Mag.* (6) **6**, p. 403. — 1903.
- 19) *N. R. Campbell*. Die Radioaktivität als allgemeine Eigenschaft der chemischen Elemente. — *Jahrb. d. Radioakt.* **2**, p. 434. — 1906.
- 20) *J. C. Mc. Lennan und E. F. Burton*. On the radioactivity of metals generally. — *Phil. Mag.* (6) **6**, p. 343. — 1903.
- 21) *H. Haga und C. H. Wind*. Die Beugung der Röntgenstrahlen. *Ann. d. Phys.* **10**, p. 305. — 1903, s. auch ⁹⁾ *Lütticher-Berichte* p. 40. — 1905.
- 22) *S. Simon*. *Wied. Ann.* **69**, p. 589. — 1899.
- 23) *P. Ewers*. Ueber die Geschwindigkeit der Kanalstrahlenteilchen. *Phys. Zeits.* **6**, p. 500. — 1905.
- 24) *Descoures*. Zur elektrostatischen Ablenkbarkeit der Rutherfordstrahlen. — *Phys. Zeits.* **4**, p. 483. — 1903.
- 25) *E. Rutherford*. Some properties of the α Rays from Radium. *Phil. Mag.* (6) **10**, p. 163. — 1905.
- 26) *A. St. Mackenzie*. The Deflexion of α Rays from Radium and Polonium. *Phil. Mag.* (6) **10**, p. 538. — 1905.
- 27) *E. Rutherford*. Charge carried by the α Rays from Radium. *Nad.* **71**, p. 413. — 1905.
Charge carried by the α and β Rays of Radium. *Phil. Mag.* (6) **10**, p. 193. — 1905.
- 28) *J. J. Thomson*. Charge on the α -Particles of Radium and Polonium. *Nat.* **71**, p. 438. — 1905.
- 29) *O. Wigger*. Zur Charakteristik der α - und γ -Strahlen. *Jahrb. d. Radioakt.* **2**, p. 391. — 1906.
- 30) *P. Ewers*. Ueber die von Polonium und Radiotellur ausgesandten Strahlungen. — *Phys. Zeits.* **7**, p. 148. — 1906.

- 31) *J. J. Thomson*. On the positive electrification of α -rays and the emissio of slowly moving cathode-rays bei radioactive substances. Proc. Cambr. Soc. **13**. p. 49. — 1904.
- 32) *F. Soddy*. Charge on the α -Particles of Radium and Polonium. Nat. **71**. p. 438. — 1905.
- 33) *W. H. Bragg*. Die α -Strahlen des Radiums. Jahrb. d. Radioakt. **2**. p. 4. — 1905.
W. H. Bragg und *R. Kleemann*. Phil. Mag. (6) **8**. p. 719 und p. 776. — 1904.
Phil. Mag. (6) **10**. p. 318. — 1905.
Phys. Zeits. **7**. p. 413. — 1906.
- 34) *E. Rutherford*. Some properties of the α -Rays from Radium. Phil. Mag. (6) **10**. p. 163. — 1905.
- 35) *Mc. Clung*. The Absorption of α -Rays. Phil. Mag. (6) **11**. p. 131. — 1906.
- 36) *H. Becquerel*. C. R. de Paris. **141**. p. 485. — 1905.
s. auch *) Lütticher-Berichte p. 80. — 1905.
s. auch Phys. Zeits. **6**. p. 666. — 1905.
E. Rutherford. Some properties of the α -Rays from Radium. Phil. Mag. (6) **11**. p. 166. — 1906.
s. auch Phys. Zeits. **7**. p. 137. — 1906.
W. H. Bragg. Die α -Strahlen des Radiums. Phys. Zeits. **7**. p. 143. — 1906.
H. Becquerel. Ueber einige Eigenschaften der von Radium oder andern Körpern, die durch Radium-Emanation aktiviert worden sind, ausgehenden α -Strahlen. Phys. Zeitschr. **7**. p. 177. — 1906.
- 37) *W. Huggins* und *Lady Huggins*. The spectrum of the spontaneous luminous radiation of Radium. Proc. Roy. Soc. **72**. p. 196 und p. 409. — 1903.
» » » **76**. p. 488 und **77**. p. 130. — 1905.
s. auch *) Lütticher-Berichte p. 64. — 1905.
- 38) *F. Himstedt* und *G. Meyer*. Spektralanalyse des Eigenlichtes von Radiumbromidkrystallen. — Phys. Zeits. **6**. p. 688. — 1905.
s. auch *) Lütticher-Berichte p. 52. — 1905.
- 39) *B. Walter*. Ueber eine von den Strahlen des Radiotellurs in der atmosphärischen Luft erzeugte neue Strahlung. Ann. d. Phys. **17**. p. 367. — 1905.
B. Walter und *R. Pohl*. Ueber das Eigenlicht des Radiumbromids. Ann. d. Phys. **18**. p. 406. — 1905.
- 40) *J. Stark*. Ueber das Leuchten von Gasen an radioaktiven Substanzen. Jahrb. d. Radioakt. **2**. p. 147. — 1905.
- 41) *K. A. Hofmann* und *F. Zerban*. Ueber radioaktives Thor. Chem. Ber. **36**. p. 3093. — 1903.
- 42) *G. v. d. Borne*. Die radioaktiven Mineralien, Gesteine und Quellen. Jahrb. d. Radioakt. **2**. p. 77. — 1905.

- 43) *W. Crookes*. Radio-activity of uranium. Proc. Roy. Soc. **66**, p. 409. — 1900.
- 44) *J. Precht*. Das Spektrum des Radiums. Jahrb. d. Radioakt. **1**, p. 61. — 1904.
- ✓ 45) *E. Rutherford & Barnes*. Heating effect of Radium. Phil. Mag. (6) **7**, p. 202. — 1904.
- ✓ 46) *K. Angstrom*. Quelques déterminations quantitatives du dégagement de chaleur du radium.
s. ⁸⁾ Lütticher Berichte p. 194. — 1905.
- 47) *S. Curie*. Sur la diminution de la radioactivité du polonium avec le temps. C. R. de Paris **142**, p. 273. — 1906.
s. auch Phys. Zeitschr. **7**, p. 146. — 1906.
- 48) *W. Marckwald*. Ueber das Radiotellur. Chem. Ber. **38**, p. 591. — 1905.
- 49) *W. Marckwald, H. Greinacher und K. Herrmann*. Ueber die Radioaktivitätskonstante des Radiotellur. Jahrb. d. Radioakt. **2**, p. 136. — 1905.
- 50) *A. Debierne*. Ueber radioaktives Blei, Radiotellur und Polonium. Jahrb. d. Radioakt. **1**, p. 220. — 1904.
- 51) *Hofmann, Gonder und Wölfl*. Ueber induzierte Radioaktivität. Ann. d. Phys. **15**, p. 615. — 1905.
- 52) *St. Meyer und E. v. Schueidler*. Recherches sur les substances radioactives. Le Radium **2** p. 389. — 1905.
s. auch Phys. Zeitschr. **7**, p. 257. — 1906.
- 53) *E. Rutherford*. Slow transformations products of Radium. Phil. Mag. (6) **8**, p. 636. — 1904. Phil. Mag. (6) **10**, p. 290. — 1904.
- 54) *F. Giesel*. Untersuchungen über das Emanium (Aktinium). Jahrb. d. Radioakt. **1**, p. 345. — 1904.
- 55) *W. Marckwald*. Ueber Aktinium und Emanium. Chem. Ber. **38**, p. 2264. — 1905.
- 56) *F. Giesel*. Ueber Emanium. Chem. Ber. **38**, p. 775. — 1905.
- 57) *T. Godlewski*. Actinium and its successive Products. Phil. Mag. (6) **10**, p. 35. — 1905.
- 58) *W. Ramsay*. Un nouvel élément: le Radiothorium. Le Radium **2**, p. 321. — 1905. s. auch ⁸⁾ Lütticher Berichte p. 116. — 1905.
- O. Hahn*. A new radioactive Element, which evolves Thorium-Emanation. Proc. Roy. Soc. **76**, p. 115. — 1905.
- O. Sackur*. The radioactivity of thorium. Chem. News **91**, p. 271. — 1905.
- G. A. Blanc*. Ueber die Natur der radioaktiven Elemente, welche in den Sedimenten der Thermalquellen von Echaillons und Salins-Moutier (Savoyen) enthalten sind. Phys. Zeitschr. **6**, p. 703. — 1905.
- O. Hahn*. Ueber ein neues, die Emanation des Thoriums gebendes, radioaktives Element. Jahrb. d. Radioakt. **2**, p. 233. — 1905.
- 59) *F. Giesel*. Ueber die „Thor-Aktivität“ des Monazit. Chem. Ber. **38**, p. 775. — 1905.
- 60) *F. Himstedt*. Die gasförmigen Eigenschaften der Emanation radioaktiver Substanzen. Jahrb. d. Radioakt. **1**, p. 138. — 1904.

- ⁶²⁾ *W. Makover.* The Molekular Weights of Radium and Thorium-Emanation. *Phil. Mag* (6) **9**. p. 56. — 1905.
- ⁶³⁾ *F. Himstedt und G. Meyer.* *Ann. d. Phys.* **17**. p. 1005. — 1905.
- ⁶⁴⁾ *W. Ramsay.* Die Emanation des Radiums, ihre Eigenschaften und Umwandlungen. *Jahrb. d. Radioakt.* **1**. p. 127. — 1904.
- ⁶⁵⁾ *E. Bosc.* Zur Kenntnis der Atomenergie, eine Beziehung zwischen kinetischer Theorie und Radioaktivität. *Jahrb. d. Radioakt.* **1**. p. 127. — 1904.
- ⁶⁶⁾ *S. J. Allan.* Radioactivity of atmosphere. *Phil. Mag.* (6) **7**. p. 141. — 1904.
- ⁶⁷⁾ *E. Rutherford.* Problèmes actuels de la radioactivité. *Arch. des sciences de Genève* **19**. p. 31. — 1905.
- ⁶⁸⁾ *F. v. Lerch.* Ueber das Th. X und die induzierte Thoraktivität. *Wien. Ber.* **114**. p. 553. — 1905.
F. v. Lerch. Die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Umwandlungsprodukte des Thoriums. *Jahrb. d. Radioakt.* **2**. p. 463. — 1906.
- ⁶⁹⁾ *Miss Slater.* On the excited Activity of Thorium. *Phil. Mag.* (6) **9**. p. 628. — 1904.
- ⁷⁰⁾ *P. Curie und J. Danne.* Sur la disparition de la radioactivité induite par le radium sur les corps solides. *C. R. de Paris* **136**. p. 364. — 1903.
- ⁷¹⁾ *Miss H. Broocks.* Decay of excited radioactivity from Thorium, Radium, Actinium. *Phil. Mag.* (6) **8**. p. 373. — 1904.
- ⁷²⁾ *Will. Duane.* Sur l'ionisation due à l'émanation du radium. *C. R. de Paris* **140**. p. 531. — 1905.
- ⁷³⁾ *P. Curie und J. Danne.* Sur la disparition de l'activité induite par le radium sur les corps solides. *C. R. de Paris* **138**. p. 638 und p. 748. — 1904.
- ⁷⁴⁾ *W. Makover.* On the Effect of High Temperatures on Radium-Emanation. *Proc. Roy. Soc.* **77**. p. 241. — 1906.
- ⁷⁵⁾ *W. Schmitt.* Ueber den Zerfall von Radium A, B und C. *Phys. Zeitschr.* **6**. p. 897. — 1905.
- ⁷⁶⁾ *H. L. Bronson.* The effect of High Temperatures on the Rate of Decay of the Active Deposit from Radium. *Phil. Mag.* (6) **11**. p. 143. — 1906.
- ⁷⁷⁾ *W. Wien.* Ueber die Selbstelektrisierung des Radiums und die Intensität der von ihm ausgesandten Strahlen. *Phys. Zeitschr.* **4**. p. 624 und p. 686. — 1903.
- ⁷⁸⁾ *J. Stark.* Gesetz und Konstanten der radioaktiven Umwandlung. *Jahrb. d. Radioakt.* **1**. p. 1. — 1904.
- ⁷⁹⁾ *P. Gruner.* Beitrag zu der Theorie der radioaktiven Umwandlung. *Ann. d. Phys.* **19**. p. 169. — 1906.
- ⁸⁰⁾ *E. v. Schweidler.* Ecart à la loi des transformations radioactives. *Le Radium* **2**. p. 400. — 1905.

- ⁸¹⁾ *B. B. Boltwood.* Sur les quantités relatives de Radium et d'Uranium contenus dans quelques minéraux. *Le Radium* **1**, p. 45. — 1904.
— The origin of radium. *Phil. Mag.* (6) **9**, p. 599. — 1905.
— The Production of Radium from Uranium. ⁶⁾ *Lütticher Ber.* p. 69. — 1905.
— On the Ultimate Disintegration Products of the Radio-active Elements. ⁸⁾ *Lütticher Ber.* p. 71. — 1905.
- ⁸²⁾ *H. N. Mc. Coy.* The origin of radium. *Chem. News.* **90**, p. 199. — 1904.
— The Relation between the Radioactivity and the Composition of Uranium Compounds. *Phil. Mag.* (6) **11**, p. 176. — 1905.
- ⁸³⁾ *E. Rutherford* und *B. B. Boltwood.* The relative proportion of radium and uranium in radioactive minerals. *Americ. Journ. of science* **20**, p. 55. — 1905.
- ⁸⁴⁾ *F. Soddy.* *Nature* Mai 1904; *Nature* Jan. 1905. The Production of Radium from Uranium. *Phil. Mag.* (6) **9**, p. 768. — 1905



**UNIVERSITY OF CALIFORNIA LIBRARY
BERKELEY**

**Return to desk from which borrowed.
This book is DUE on the last date stamped below.**

3 Jan '50 JA

RES 12 0 6

RECEIVED

JAN 24 '70 - 1 PM

LOAN DEPT.

LD 21-100m-9,'48 (B899s16) 476

